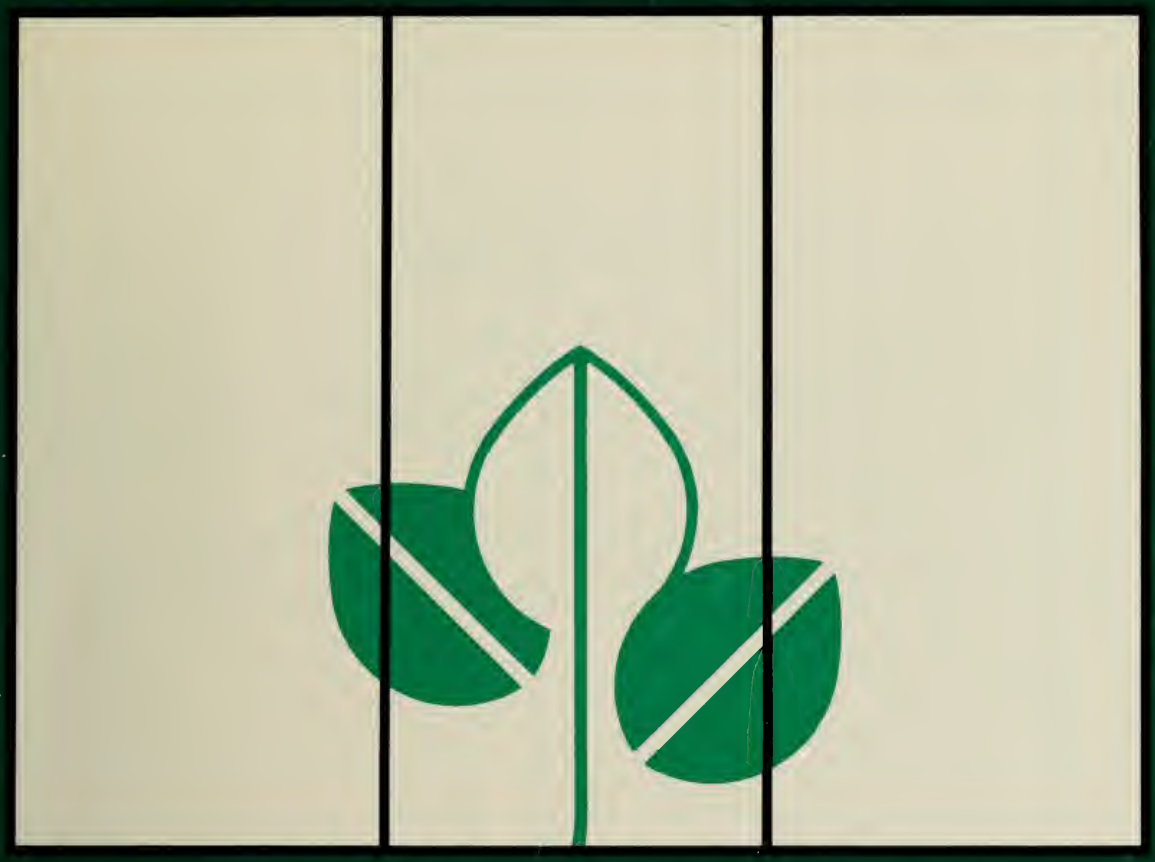


Serres solaires commerciales

630.4
C212
P 1816
1987
fr.
OOAg
c.3

Agriculture Canada

Publication 1816

LIBRARY - BIBLIOTHÈQUE
Agriculture
Canada
DEPARTMENTAL LIBRARY
BIBLIOTHÈQUE DU MINISTÈRE
ÉDIFICE SIR JOHN CARLING BLDG.
OTTAWA ONTARIO
K1A 0C5
LIBRARY - BIBLIOTHÈQUE
LIBRARY - BIBLIOTHÈQUE
LIBRARY - BIBLIOTHÈQUE

Serres solaires commerciales

G.J. Monk
Directeur
Western Bio-tech Engineering Ltd.
Vancouver Ouest, C.B.

D.H. Thomas
Coordinateur
Greenhouse Horticulture Technology
Malaspina College
Nanaimo, C.B.

J.M. Molnar
Directeur
Station de recherche d'Agassiz
Agriculture Canada
Agassiz, C.B.

L.M. Staley
Professeur
Bio-Ressource Engineering
University of British Columbia, C.B.

La recherche décrite dans la présente publication a été effectuée à la
Station de recherche et de quarantaine des plantes de Saanichton

On peut obtenir de plus amples renseignements à l'adresse suivante :
Directeur
Station de recherches
Agriculture Canada
B.P. 1000
Agassiz, B.C.
V0M 1A0

Préparé pour Agriculture Canada selon les termes du contrat no: 08SB.01843-1-ER04 d'Approvisionnements et Services Canada.

La mention d'un type de produit, d'une marque ou d'une firme en particulier n'engage en rien la responsabilité du Gouvernement du Canada ou d'Agriculture Canada.

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
Publication 1816
1987

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue A15-1816/1987F au Canada: $6.75
ISBN 0-660-92195-2 à l'étranger: $8.00

Prix sujet à changement sans préavis

Données de catalogage avant publication (Canada)

Serres solaires commerciales

(Publication ; 1816F)

Publié aussi en anglais sous le titre : Solar greenhouses for commercial growers.
Bibliographie : p.

1. Serres solaires – Plans et construction.
2. Serres – Chauffage et ventilationn. I. Monk, G.J. (Gordon J.) II. Collections : Publication (Canada. Agriculture Canada).
Français ; 1816F.

SB416.S614 1987 690'.892 C87-099204-X

Table des matières

Introduction 5

Considérations d'ordre climatique 6

Ensoleillement 7
Température 7
Chutes de neige 8
Vent 8

Choix du site 10

Topographie 10
Surface de la nappe phréatique 11
Orientation de la serre 11

Système de chauffage solaire utilisant l'entreposage de chaleur dans le sol 12

Description 12
Applications 14
Directives de conception 19

Choix du matériau des tuyaux 20
Longueur, espacement, profondeur et pente des tuyaux 21
Vitesse de circulation d'air et dimension du ventilateur 22
Chambres de distribution d'air et conduits 23
Isolation du périmètre souterrain 24

Frais d'installation 24
Frais d'exploitation et rendement sur une base annuelle 24
Analyse économique 25

Système de chauffage solaire dans une demi-serre 26

Description 26
Applications 29
Directives de conception 31
Frais d'installation 32
Frais d'exploitation et rendement sur une base annuelle 32
Analyse économique 33

Système de chauffage à stockage à eau 34

Système de réglage d'ambiance pour les serres solaires 36

Conclusion 37

Remerciements 38

Bibliographie 39

Annexes 41

Introduction

L'industrie nord-américaine de la serre hésite à adopter le chauffage solaire en tant que mesure pour diminuer les coûts énergétiques. Elle considère cette technologie trop coûteuse, trop complexe et pas assez fiable. Il n'en demeure pas moins que les recherches sur les serres solaires subventionnées par Agriculture Canada ont donné des résultats prometteurs.

En effet, des études sur les serres solaires ont donné des résultats positifs à la Station de recherche et de quarantaine des plantes de Saanichton en Colombie-Britannique. Cette station se trouve située à 48° 37′ de latitude nord et à 25 km au nord de Victoria. Les serres expérimentales y bénéficient d'une isolation effective d'environ 2100 heures sur une base annuelle. Cette isolation se situe légèrement au-dessus de la moyenne de 2035 heures pour 38 emplacements différents disséminés dans la partie sud du Canada.

Trois serres solaires différentes ont été construites à la station de recherche. La première mesure 10,8 m × 19,2 m et est une serre individuelle ordinaire en verre. Elle comporte un système de chauffage solaire avec entreposage de chaleur dans le sol et des écrans thermiques. La deuxième serre mesure 6,4 m × 18,3 m et est une construction à un versant. Elle est en fait la moitié d'une serre ordinaire préfabriquée en verre sur acier galvanisé dont le toit nord a été éliminé et le mur nord isolé. Cette demi-serre est équipée d'un capteur solaire intégré ainsi que d'un système de chauffage à stockage sur lit de cailloux de même que d'écrans thermiques. La troisième est une serre préfabriquée avec arches métalliques et revêtement de polyéthylène, qui mesure 8,84 m × 15,24 m. Cette serre est chauffée exclusivement par un système de chauffage solaire à stockage enterré.

La présente publication vise à donner aux producteurs certaines informations de base sur le chauffage solaire. Elle étudie certaines des méthodes utilisées pour stocker le surplus d'énergie solaire, donne des directives de conception, détermine la rentabilité et la fiabilité des serres solaires qui sont ou bien des constructions nouvelles ou des serres ordinaires ayant subi des transformations. Les directives s'appuient seulement sur les conclusions des expériences qui ont été effectuées à Saanichton, Colombie-Britannique.

Les renseignements fournis devraient aider le producteur à décider s'il doit ou non entreprendre d'installer un système de chauffage solaire. Cependant, un ingénieur agricole devrait être consulté avant de prendre la décision finale.

Considérations d'ordre climatique

Pour des raisons évidentes, le climat joue un rôle important dans le bon fonctionnement d'une serre solaire. Les quatre éléments à considérer sont l'ensoleillement, la température, les chutes de neige et le vent.

Vous trouverez à l'annexe A certaines données météorologiques provenant de stations météo représentatives dans tout le pays. Les valeurs moyennes du rayonnement solaire global quotidien ainsi que les heures d'insolation effective figurent dans les tableaux 1 et 2, respectivement. Les données relatives à la température figurent dans le tableau 3 et les données sur les chutes de neige se trouvent dans le tableau 4. Finalement, le tableau 5 donne des renseignements sur la vitesse moyenne du vent et sa direction dominante (Service de l'environnement atmosphérique du Canada, 1982 *a, b, c, d, e*). En ce qui a trait à l'insolation effective et à la vitesse du vent, il arrive dans certains cas que nous ne disposions pas des données pour la station mentionnée. Dans ces cas, les données correspondant à la station la plus proche (non identifiée) ont été inscrites. Pour les emplacements non mentionnés, nous suggérons au producteur de s'adresser au Bureau météorologique d'Environnement Canada le plus près afin d'obtenir des données représentatives.

La plupart des producteurs achètent des serres préfabriquées dont la structure est en acier galvanisé et en aluminium. Toutefois, si des lecteurs désirent faire leurs plans et construire leurs propres serres, nous leur conseillons de ne pas utiliser les données météorologiques extrêmes, sinon ils risquent de se retrouver devant une construction, un système de chauffage et ainsi de suite, qui seront surdimensionnés. La serre doit être conçue conformément au Code national du bâtiment du Canada. Avant de commencer la construction, les lecteurs devraient consulter d'autres documentations concernant les normes de conception des serres (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1981; National Greenhouse Manufacturers Association, 1981; Flowers Canada Inc., 1983).

Étant donné la grande diversité des conditions climatiques, des constructions de serres, des exigences propres au type de culture et ainsi de suite, que l'on rencontre au Canada, il est difficile de faire des recommandations concernant les qualités d'un site particulier pour des serres solaires. Les constructions solaires qui ont été mises à l'essai à Saanichton n'ont pas été évaluées dans d'autres régions du pays. Néanmoins, les directives préliminaires qui suivent concernent les conditions climatiques.

Ensoleillement

La quantité d'énergie solaire disponible est influencée par la saison, l'heure de la journée, les conditions atmosphériques, l'orientation et l'emplacement de la serre (Jackson, 1983). Normalement, les conditions de température et les données relatives à l'ensoleillement doivent être prises en considération au moment de déterminer le potentiel d'un site pour le chauffage solaire (voir la section suivante à ce sujet). Toutefois, le fonctionnement efficace d'une serre solaire est largement tributaire des valeurs moyennes quotidiennes du rayonnement solaire global ainsi que du nombre d'heures d'insolation effective. Si les valeurs de rayonnement solaire reçues à un certain site sont inférieures à la moyenne canadienne, il est probable que le chauffage solaire soit impraticable à cet endroit.

La période critique à considérer s'étend de mars à octobre; pendant l'hiver, de novembre à février, virtuellement tout le rayonnement solaire emprisonné dans une serre est nécessaire pour répondre aux besoins de chauffage dans la journée (Blom et autres, 1982; Jackson, 1983).

Les résultats des expériences effectuées à Saanichton ont servi à établir les valeurs minimales d'ensoleillement nécessaires au chauffage solaire. Si la somme des valeurs du rayonnement global moyen quotidien pour chaque mois de la période de mars à octobre est supérieure à 125 MJ/m^2, le site peut convenir à des serres solaires (tableau 1). Si on ne dispose pas de données sur le rayonnement global, le nombre total d'heures d'insolation effective au cours de la même période devrait être déterminé. Le chauffage solaire pourrait être praticable si le total excède 1500 heures (tableau 2).

Température

Après avoir considéré l'ensoleillement disponible, le facteur suivant le plus important au niveau du fonctionnement d'une serre solaire est la température. Dans les climats froids, les températures hivernales accélèrent les pertes de chaleur de l'intérieur de la serre ainsi que des stockages thermiques souterrains. Pendant les jours ensoleillés, le surplus d'énergie solaire ne peut pas être stocké si les températures froides à l'extérieur entraînent des pertes de chaleur excessives. Si, par ailleurs, le sol qui se trouve autour des stockages thermiques est aussi très froid, les pertes de chaleur du stockage vont rendre difficile le maintien d'un niveau adéquat de chaleur en réserve. Il est important de noter que même si les stockages thermiques sont plus chauds que le sol environnant, la chaleur stockée devient inutilisable si la température du stockage est inférieure à la température nécessaire dans la serre pendant la nuit.

La méthode de calcul des déperditions de chaleur ainsi que des apports de chaleur nets pendant le jour est bien établie (Conseil national de recherches du Canada, 1981*b*; Blom et al., 1982; Darby, 1982; Kadulski et al., (date inconnue); Roberts et al., 1985). Le tableau 3 donne les totaux annuels de degrés-jours pour le chauffage dans différents sites au Canada. Un degré-jour équivaut à une température moyenne quotidienne ayant un écart d'un degré par rapport à 18 °C pendant une période de 24 heures. Au fur et à mesure que l'écart augmente, la quantité de chaleur nécessaire pour maintenir la température ambiante dans la serre à 18 °C augmente de façon

proportionnelle. Si le rayonnement solaire dont on dispose est suffisant par rapport à la charge thermique pendant la période de culture qui se situe entre mars et octobre, le chauffage solaire peut être économique dans les serres.

Pour établir le rapport entre le rayonnement solaire et la charge thermique, il faut étudier le rapport entre les sommes des valeurs du rayonnement global moyen quotidien et le nombre de degrés-jours pour chaque mois au cours de la période de culture. Si le rapport est supérieur à 0,08, alors le chauffage solaire peut être praticable à ce site en particulier.

Par exemple, ce rapport pour Edmonton, en Alberta (un des endroits les plus ensoleillés au Canada), est de 131,82 MJ/m² de rayonnement global moyen quotidien pour 2425 degrés-jours. Après division, on arrive à un résultat de 0,054. Par conséquent, Edmonton ne convient pas à des serres solaires à cause des nuits très froides au printemps et à l'automne. Par contre, Toronto en Ontario, a 135,86 MJ/m² pour 1591 degrés-jours, soit 0,085. Ainsi, une serre solaire bien conçue pourrait y être rentable.

Si on ne dispose pas de données sur le rayonnement global quotidien pour l'emplacement en question, il faudrait évaluer le rapport entre les heures d'insolation effective et le nombre de degrés-jours. Dans ce cas particulier, le chauffage solaire pourrait être sérieusement envisagé si le rapport excède 0,8. Par exemple, à Vancouver, en Colombie-Britannique, le nombre total d'heures d'insolation effective au cours de la période entre mars et octobre est de 1669, tandis que le nombre de degrés-jours est de 1372. Cela donne un rapport de 1,22, indiquant qu'une évaluation technique préliminaire de la conception devrait être effectuée. Nous tenons à mettre le lecteur en garde: la deuxième méthode est moins précise et donne des résultats moins conservateurs.

Chutes de neige

La structure d'une serre doit être conçue pour supporter le poids d'une accumulation de neige, conformément au Code national du bâtiment du Canada. La surcharge causée par la neige est établie en prenant pour base l'accumulation maximale de neige en 24 heures (tableau 4).

Il se peut que le lecteur envisage d'utiliser l'énergie solaire seulement pour prolonger la période de culture dans une construction qui ne disposerait d'aucun autre moyen de chauffage. Dans ce cas on ne dispose d'aucune source de chaleur pour faire fondre la neige. Par conséquent, le toit doit être construit pour supporter les accumulations établies par calcul ou encore, il doit avoir une pente suffisamment prononcée pour que la neige ne puisse y rester et les murs latéraux doivent être assez hauts pour que la neige laisse le toit dégagé. Le producteur devrait s'adresser à Flowers Canada Inc. (1983) et à la National Greenhouse Manufacturers Association (1981) pour obtenir des renseignements complets sur le sujet.

Vent

Une serre qui est constamment exposée à de forts vents peut voir sa charge thermique augmenter jusqu'à 25 % annuellement. En général, il n'est pas recommandé de construire des serres dans des emplacements exposés

où les vitesses moyennes du vent dépassent les 25 km/h pendant les mois d'hiver (tableau 5). Il est possible de protéger la serre et de diminuer les pertes de chaleur de 5 % à 10 % en construisant un brise-vent. Cet abri ne doit en aucun cas faire de l'ombre sur la surface cultivée, ce qui constitue un point d'une importance particulière avec les serres solaires. Pour obtenir des directives sur la construction des brise-vent ainsi que sur leurs avantages et leurs coûts qui leur sont attachés, voir Roberts et al. (1985).

Choix du site

Il faut tenir compte de plusieurs facteurs lorsqu'il s'agit de choisir un site pour une exploitation de serres commerciales. Ce site devrait être relativement plat étant donné qu'il faut égaliser le sol avant de commencer la construction. L'emplacement devrait être bien égoutté et offrir un espace suffisant et l'orientation nécessaire à une éventuelle expansion. Il faut aussi considérer la distance à parcourir jusqu'aux marchés, ainsi que l'état des routes. De toute évidence, il est essentiel de disposer d'un ensoleillement considérable. Si on a le choix, il est préférable de disposer d'une exposition au soleil du matin plutôt qu'à celui de fin d'après-midi ou de début de soirée. Le processus de photosynthèse des plantes commence dès qu'elles reçoivent leur premier rayon de lumière. Par contre, au cours des longues journées très chaudes certaines plantes peuvent ralentir leur processus de photosynthèse vers le milieu de l'après-midi à cause des pertes importantes d'eau qui sont le résultat d'une transpiration rapide ainsi que d'autres facteurs reliés au stress. Dans les endroits protégés situés plus bas, le soleil du matin est d'une importance primordiale pour diminuer les charges thermiques et pour dissiper le brouillard.

Au moment de choisir un site pour une serre solaire, il faut prêter une attention spéciale à la topographie, à la nappe phréatique ainsi qu'à l'orientation de la serre.

Topographie

Le site doit être à toutes fins pratiques libre de tout obstacle pouvant faire écran au rayonnement solaire. S'il est impossible d'enlever les obstacles, il faudra déterminer le pourcentage d'ensoleillement perdu chaque jour à l'aide des méthodes et des tables qui figurent à l'annexe B. Si le pourcentage d'ensoleillement caché excède 15 % pendant les mois de mars à octobre qui constituent la période de culture, alors ce site ne convient probablement pas au chauffage solaire.

Les systèmes de chauffage solaire étudiés ici sont conçus pour utiliser des stockages thermiques souterrains installés à des profondeurs d'environ 1 m. Les prévisions des dépenses dans les études de faisabilité supposent l'utilisation d'un creuseur de tranchées ou d'une pelle rétrocaveuse pour faire l'installation de la tuyauterie ou des stockages sur lit de cailloux. Ces prévisions de dépenses monteraient en flèche s'il devenait nécessaire de dynamiter le roc pour pouvoir installer les systèmes solaires et risqueraient de miner sérieusement le potentiel économique de n'importe quel projet. Par conséquent, il est d'une importance primordiale de s'assurer qu'il n'y a

pas de roche solide à moins de 1 m de la surface du site choisi. De grosses roches risquent aussi vraisemblablement de causer des problèmes. Une argile limoneuse constitue le matériau idéal pour travailler, mais certains problèmes peuvent quand même surgir avec n'importe quel type de matériau meuble.

Nappe phréatique

Le fait d'enterrer le stockage dans le sol accroît aussi l'importance de la nappe phréatique en tant que facteur à considérer lors du choix du site. Si les eaux souterraines peuvent circuler à travers un stockage, la chaleur stockée sera rapidement perdue. Il est possible d'empêcher cela en installant un système de drainage sur tout le périmètre de la serre à une profondeur de 0,5 m plus bas que le stockage.

Il est recommandé de placer les tuyaux de drainage dans de la roche ou du gravier qui permettront à l'eau de s'égoutter facilement. La roche ou le gravier entourant les tuyaux devrait occuper un espace commençant à 30 cm sous le niveau du sol jusqu'à 10 cm sous les tuyaux. Si le système de stockage thermique est installé contre le mur nord, la surface de la nappe souterraine peut se trouver aussi haut que 1 m sous le niveau du sol.

Orientation de la serre

La serre solaire à stockage enterré peut s'adapter à n'importe quelle orientation. Cependant, d'autres types de conception, y compris la demi-serre solaire, ne fonctionnent adéquatement que lorsqu'elles sont orientées selon un axe est-ouest.

La plupart des exploitations de serres se situent dans la partie sud du Canada (entre le 43 ° et le 50 ° de latitude nord). Dans certaines régions, la quantité de lumière disponible en hiver peut constituer un facteur limitatif. Pour les serres individuelles, une orientation d'est en ouest est généralement utilisée de préférence à une orientation nord-sud parce que de cette façon on maximise la quantité de lumière en hiver, et on la réduit en été, ce qui permet de diminuer les besoins en ventilation. L'avantage de l'orientation d'est en ouest devient de plus en plus évident au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. Par ailleurs, si un producteur décidait d'isoler le mur nord d'une serre individuelle, il pourrait diminuer encore davantage ses déperditions de chaleur avec une orientation d'est en ouest.

Avec les serres à chapelles multiples jumelées, la transmission de la lumière favorisée par une orientation est-ouest est plus que déphasée par les zones d'ombres fixes produites par les gouttières. C'est pour cette raison que les serres à chapelles multiples jumelées sont presque toujours orientées nord-sud. Cette orientation permet aux ombres produites par les gouttières de se déplacer d'ouest en est à travers chaque baie pendant la journée.

Système de chauffage solaire à stockage enterré

Description

Un système de chauffage solaire à entreposage de chaleur dans le sol (fig. 1) utilise le sol qui se trouve sous le plancher comme matériau de stockage de la chaleur. À mesure que, dans la serre, la température de l'air s'élève au-dessus de la valeur demandée, l'air chaud qui s'accumule près du sommet est aspiré à l'intérieur d'un réseau de tuyaux enfouis sous le plancher à l'aide d'un grand ventilateur électrique. Comme il se produit un échange de chaleur avec les tuyaux, ceux-ci deviennent plus chauds et transmettent leur chaleur au sol environnant. L'air refroidi et déshumidifié est ensuite refoulé dans la serre. Par conséquent, même si le système de stockage enterré recueille la chaleur, il fonctionne aussi comme un système de refroidissement de première phase. Le stockage est complètement chargé lorsque la température de l'air à la sortie des tuyaux est égale ou supérieure à la température de l'air au niveau de la bouche d'air. Le ventilateur solaire ne devrait pas fonctionner quand le stockage a atteint sa température maximale, parce qu'à ce moment là on gaspille purement et simplement l'énergie électrique. Il faudra prévoir un système de refroidissement de deuxième

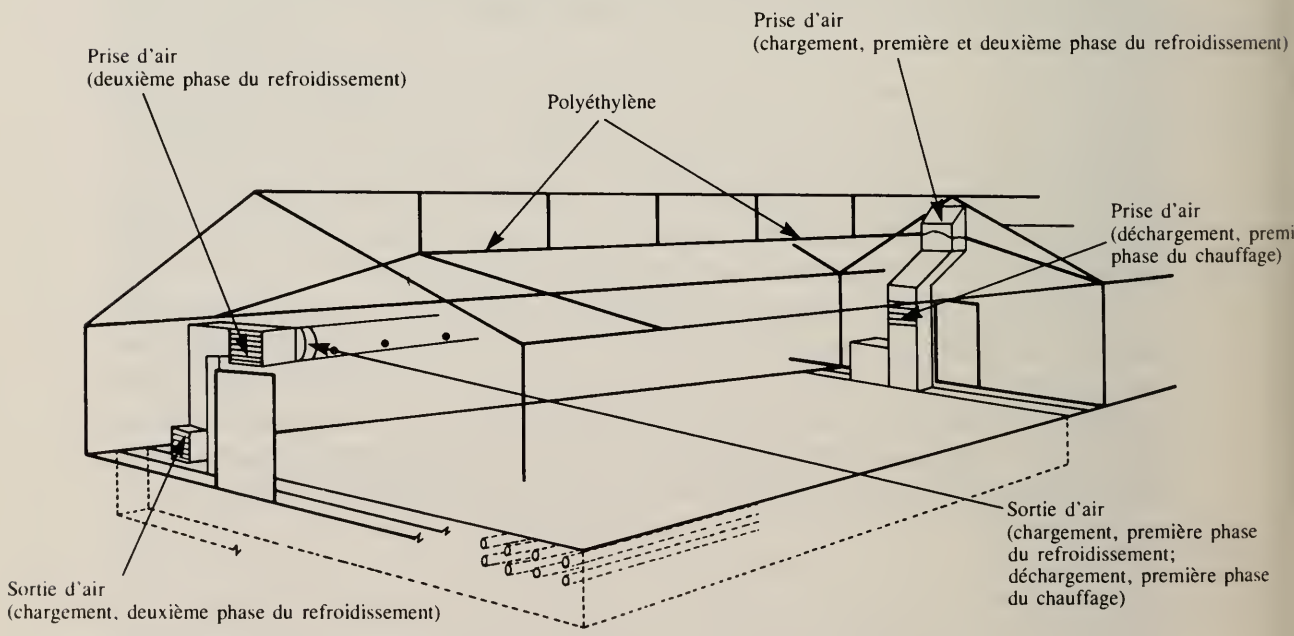


Fig. 1 *Schéma d'un système de chauffage à stockage enterré pour les serres individuelles.*

phase pour ces occasions et aussi pour tous les cas où le système de stockage ne réussit pas à refroidir suffisamment l'air ambiant pour maintenir la température demandée.

Lorsque la température ambiante tombe au-dessous de la valeur demandée, il est possible de puiser de la chaleur dans le stockage si le sol est à une température plus élevée. La presque totalité de la chaleur est évacuée dans la serre en faisant circuler de nouveau l'air ambiant dans ces tuyaux. L'air absorbe la chaleur par l'intermédiaire des parois du tuyau avant de retourner à la serre. Une faible proportion de la chaleur stockée est transmise par conduction à l'intérieur de la serre à travers le plancher.

Le stockage est complètement déchargé lorsque la température de l'air à la sortie des tuyaux est égale ou inférieure à celle de la température ambiante dans la serre. Le ventilateur solaire ne devrait pas fonctionner lorsque le stockage est vide pour éviter le gaspillage d'énergie électrique. S'il est nécessaire de maintenir une température minimale préétablie, il faudra prévoir un système de chauffage d'appoint. Ce système devrait être de dimension suffisante pour répondre aux charges thermiques calculées pour l'hiver parce que, dans ces conditions, on ne pourra pas compter sur le système de chauffage solaire. Le système de chauffage d'appoint peut être utilisé de concert avec le système de stockage thermique dans le sol chaque fois que la chaleur provenant du chauffage solaire est disponible mais en quantité insuffisante pour maintenir la température demandée dans la serre au degré préétabli.

Il est possible d'augmenter l'efficacité du ventilateur solaire en l'installant pour qu'il puisse fournir une ventilation dynamique dans la serre, ce qui constituerait la deuxième phase du système de refroidissement. En installant une bouche d'entrée avec volet motorisé à l'extrémité de la serre qui se trouve en face du ventilateur, on aspire à l'intérieur l'air frais qui traverse la serre. Cet air va ensuite s'engager dans la prise d'air, traverser le ventilateur et être poussé à circuler dans les tuyaux. Le système de stockage thermique va agir comme un échangeur de chaleur en retirant la chaleur de l'air aspiré avant de le rejeter à l'extérieur par une bouche de sortie motorisée.

L'efficacité globale du système de stockage peut aussi être améliorée en élevant la température de l'air à la bouche d'entrée durant le chargement. Il suffit d'étendre une épaisseur de polyéthylène sous le faîte, créant ainsi une zone horizontale d'air relativement stable. La pellicule de plastique devrait s'étendre le long du pignon adjacent à la bouche d'entrée d'air du ventilateur jusqu'à environ 1 m du pignon opposé, laissant ainsi un espace libre pour servir de prise d'air.

La distance entre la couverture du toit et le plastique devrait être d'environ 1 m. Il faut cependant mettre le lecteur en garde parce que cette façon de procéder diminue considérablement l'efficacité des ouvrants en toiture, la pellicule de plastique empêchant l'air de circuler librement jusqu'aux cultures.

S'il y a des écrans thermiques dans la serre, une bouche d'entrée d'air simple peut être installée en-dessous. Toutefois, une deuxième bouche d'entrée d'air pour le jour devrait être installée au-dessus des écrans si la température dans le faîte est d'au moins 3 °C plus élevée qu'au-dessous des écrans.

Applications

Les systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol n'utilisent aucun type de capteur solaire pour accumuler la chaleur. C'est la serre elle-même qui sert de capteur solaire, utilisant à la fois le rayonnement direct et le rayonnement diffus qui est transmis à travers toute la surface de la structure. Par conséquent, un système à stockage enterré peut être installé dans n'importe quelle serre, peu importe son orientation ou la forme de sa construction. Une orientation nord–sud permet d'améliorer le rendement en été étant donné qu'elle laisse pénétrer plus de lumière dans la structure.

Dans les serres individuelles, l'inclinaison idéale du toit, c'est-à-dire celle qui favorise au maximum la transmission de la lumière, est d'environ 10° de moins que la latitude. Par exemple, si la serre se trouve à une latitude de 49°, l'inclinaison de toit idéale sera de 39°. Cependant, une inclinaison aussi prononcée entraînerait des dépenses importantes de construction et d'exploitation. La plupart des serres commerciales ont une inclinaison de toit de 26 ° ou 32 ° (Mastalerz, 1977). À un coût raisonnable, ces inclinaisons permettent à la neige de glisser du toit, favorisent un degré élevé de transmission de lumière et empêchent les gouttes de condensation de se former.

Le type de matériau utilisé pour recouvrir la structure n'a pas vraiment d'importance parce que les surfaces à l'intérieur absorbent soit les rayons directs, soit la lumière diffuse et par la suite transmettent la chaleur à l'air ambiant de la serre. Le vitrage favorise une meilleure transmission de la lumière que les autres matériaux mais, par contre, il offre peu de protection contre les pertes de chaleur. Les pellicules de polyéthylène double épaisseur ne transmettent pas autant de lumière, mais d'un autre côté, leur résistance à l'échange de chaleur est plus forte. Étant donné que les déperditions de chaleur à travers la couverture sont plus faibles, il est possible de stocker une plus grande proportion du surplus de chaleur accumulée. Idéalement, la couverture devrait garantir à la fois une très bonne transmission de la lumière et une grande résistance à la déperdition de chaleur. Certains matériaux en acrylique double épaisseur offrent les deux avantages mais à un coût très élevé.

Les serres préfabriquées cylindriques en polyéthylène double constituent, à l'heure actuelle, les serres les moins chères et les plus faciles à construire. Les arches en acier galvanisé sont soutenues par une semelle en béton et les murs des extrémités sont habituellement montés avec des 2 × 4 qui soutiennent une porte coulissante. Les producteurs qui débutent dans l'exploitation des serres commerciales construisent souvent au départ ce type de serres vu les faibles coûts en capital et en chauffage qu'elles entraînent.

Les systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol sont compatibles avec ce type de structure, particulièrement s'ils sont faits de façon à coûter le moins cher possible (fig. 2). Le réseau de tuyauterie au-dessus du sol peut être éliminé si on prolonge les tuyaux qui sortent du sol de façon à pouvoir les retourner à leur extrémité vers la serre pour leur permettre d'évacuer l'air juste au-dessus des cultures.

Dans les climats modérés, un système d'entreposage de chaleur dans le sol dans une serre tunnel en polyéthylène double épaisseur peut maintenir la température ambiante au-dessus du point de congélation à moins que les

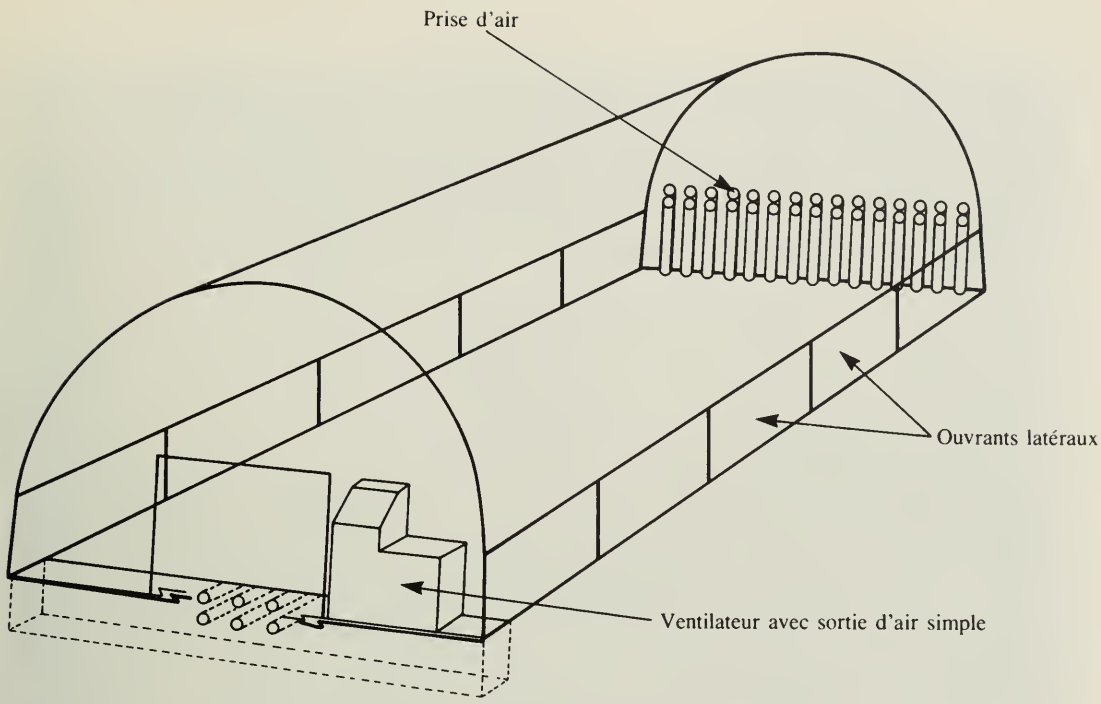


Fig. 2 *Système de chauffage à entreposage de chaleur dans le sol pour serres tunnels.*

températures à l'extérieur ne chutent au-dessous de -10 °C. Une serre de ce type peut constituer un moyen peu coûteux de protéger de jeunes pousses pendant l'hiver. Le système d'entreposage de chaleur dans le sol peut aussi prolonger la période de croissance dans une serre tunnel non chauffée lorsque des systèmes de chauffage d'appoint sont installés, le système d'entreposage de chaleur dans le sol peut assurer un excellent rapport coût–efficacité au niveau de l'économie d'énergie.

De toute évidence, il est plus simple et beaucoup moins coûteux d'installer un système d'entreposage de chaleur dans le sol avant de construire la serre. Cependant, il est très facile d'installer après coup un système d'entreposage de chaleur dans le sol dans n'importe quelle serre pourvu qu'elle n'ait pas un plancher de béton. Si les cultures se font directement à même le sol, le système de stockage va non seulement économiser l'énergie, mais encore il va agir comme système de chauffage pour les racines. Il peut s'ensuivre une croissance plus rapide des plantes et une augmentation des rendements de la récolte (fig. 3 et 4).

Une fois que le système d'entreposage de chaleur dans le sol a été installé, on peut recouvrir le plancher de gravier, de copeaux de bois ou de béton mousse. Le béton mousse (fig. 5) est un mélange de ciment et de gravier sans addition de sable. L'eau le traverse facilement en passant par les espaces vides autour des cailloux. Il est important de permettre au surplus de l'eau d'arrosage de s'écouler dans le sol autour des tuyaux pour empêcher ce dernier de se dessécher. En effet, si le sol se déshydrate, sa conductivité thermique et sa capacité d'emmagasiner de la chaleur vont diminuer considérablement (Conseil national de recherches du Canada, 1977). Qui plus est, on peut assister à un retrait du sol, ce qui aurait pour effet de le séparer d'avec les tuyaux. Cette séparation diminuerait de façon radicale l'échange de chaleur entre les tuyaux et le sol. Le rétrécissement du sol pourrait aussi faire crevasser le plancher en béton et l'endommager.

Dans les serres à simple chapelle en vitrage avec un système de refroidissement de deuxième phase, la ventilation naturelle est préférable à la ventilation dynamique parce que les ventilateurs aspirants coûtent très cher à faire fonctionner. Dans les parties de la serre où il y a un ouvrant latéral et en toiture (fig. 6), l'ouvrant latéral devrait être ouvert en premier pour empêcher le surplus de chaleur accumulée dans le faîte de s'échapper. Cet air chaud est

Fig. 3 *Plants de chou-fleur, chou et brocoli à cinq semaines de croissance, dans une serre tunnel solaire à entreposage de chaleur dans le sol. Notez que les rangs se touchent presque.*

Fig. 4 *Plants de chou-fleur, chou et brocoli à cinq semaines de croissance, dans une serre tunnel non chauffée. Notez que les plantes ont une croissance plus lente.*

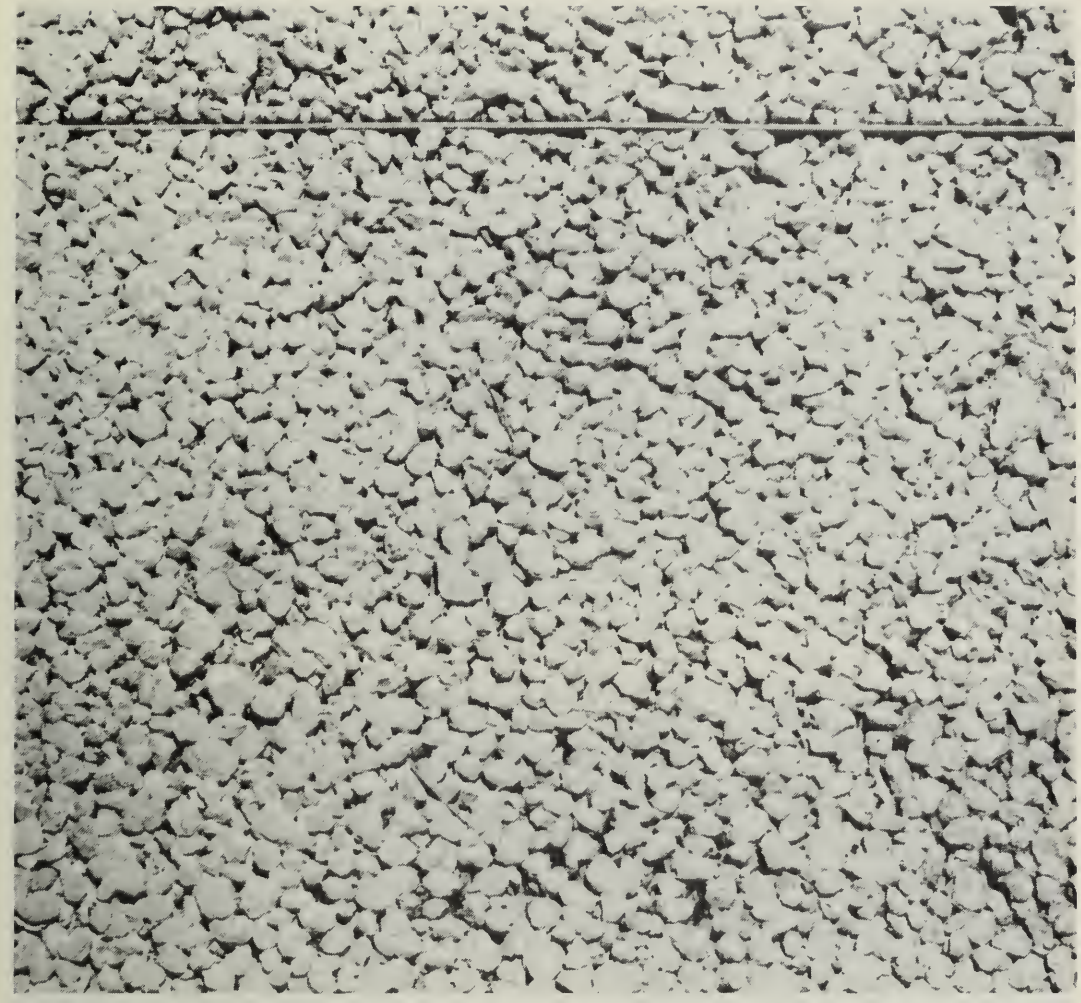


Fig. 5 *Plancher en béton mousse permettant à l'eau de s'égoutter.*

ensuite aspiré dans les tuyaux enfouis, ce qui permet à l'air plus frais de s'élever et de le remplacer. Les ouvrants en toiture ne devraient être ouverts qu'une fois que la température ambiante s'est élevée bien au-dessus de la valeur de référence ou encore, une fois que le stockage est complètement chargé.

La ventilation dynamique est souvent utilisée dans les serres en polyéthylène, en l'absence d'ouvrant latéral et en toiture. Les ventilateurs munis de tubes de distribution perforés en polyéthylène sont populaires (fig. 7). Parfois, un dispositif de chauffage est installé derrière le ventilateur. Cela permet la distribution de l'air tiède, qui est évacué hors du stockage enterré ou de l'aérotherme le long du tube perforé. Si les perforations du tube sont pointées vers le haut, l'air chaud se trouve poussé à travers la partie haute de la serre plutôt que directement sur les cultures. Certaines plantes notamment les tomates ne transpirent pas normalement si on projette de l'air chaud sur leur feuillage. Par ailleurs, le mouvement de l'air contre le toit diminue les gouttes de condensation. Le fait qu'il y ait moins de condensation réduit par le fait même les pertes de chaleur et les risques de propagation des maladies. En outre, cela améliore la transmission de la lumière à travers le matériau de couverture dans la journée.

Fig. 6 *Serre individuelle avec ouvrant latéral ouvert en premier, suivi de l'ouvrant en toiture situé sous le vent.*

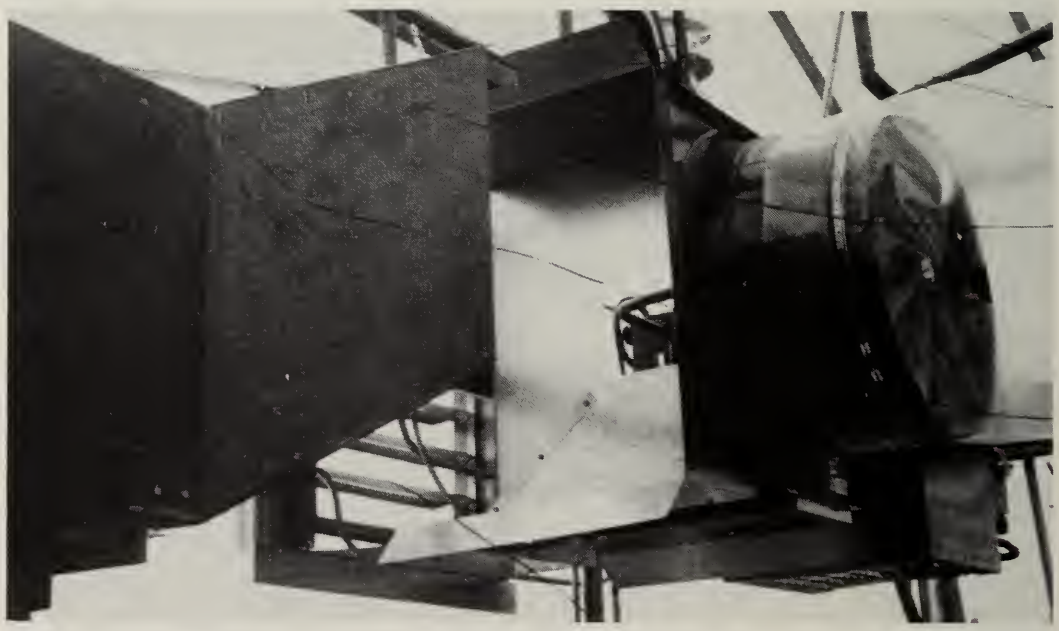


Fig. 7 *Ventilateur soufflant et tube de distribution perforé avec dispositif de chauffage. Le conduit qui transporte l'air à partir du stockage thermique se trouve sur la gauche. L'aérotherme au propane se trouve à droite.*

Les serres à double épaisseur de polyéthylène peuvent être climatisées par ventilation naturelle à l'aide d'ouvrants latéraux enroulables (fig. 8 et 9). Si les ouvrants sont gonflés à l'aide d'un petit ventilateur centrifuge, ils vont former un joint étanche une fois fermés et diminuer les pertes de chaleur le long des couches de plastique. La tige qui permet l'enroulement de l'ouvrant peut être motorisée. Cela élimine le besoin de main-d'oeuvre et permet d'obtenir un contrôle automatique. Par contre, le coût est prohibitif par rapport au coût de l'ensemble de la construction.

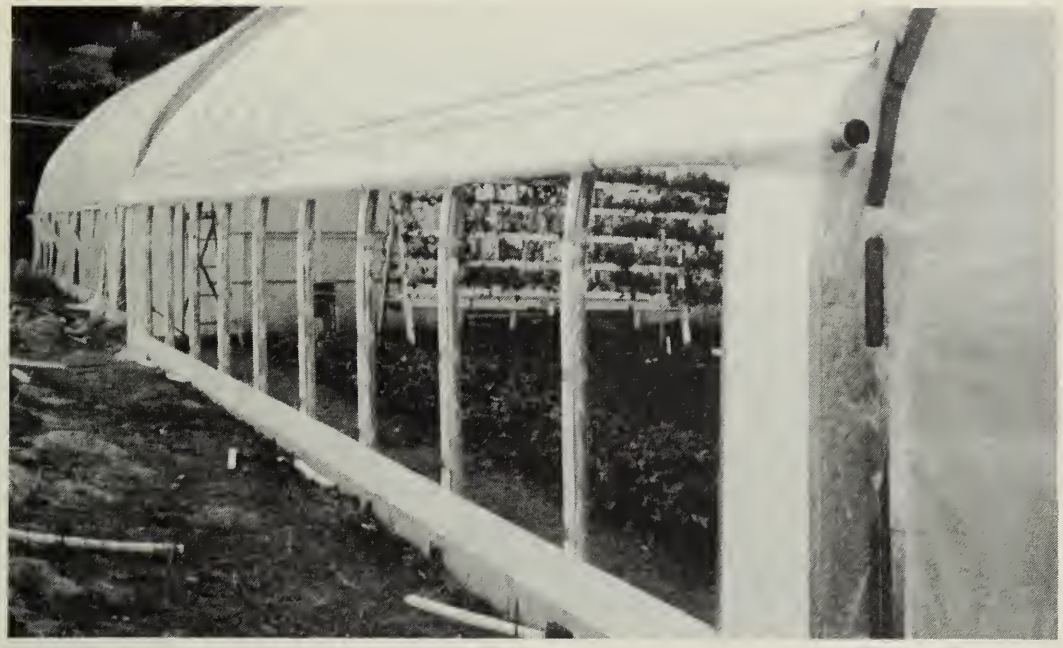


Fig. 8 *Ouvrant latéral en polyéthylène enroulé sur une tige.*

Fig. 9 *Ouvrant latéral en polyéthylène gonflé fermant avec un joint étanche.*

Directives de conception

Les directives de conception suivantes s'appuient sur les résultats des expériences effectuées à Saanichton ainsi que sur des recommandations tirées d'autres recherches dont les résultats ont été publiés. Pour aider le lecteur, nous donnons des exemples d'application de ces directives à une serre d'environ 930 m². Nous supposons que la serre mesure 48 m de long sur 19,2 m de large. Les dimensions sont basées sur l'espacement qui existe entre les poteaux d'une serre du type Venlo.

Choix du matériau des tuyaux

Des recherches effectuées au Japon sur le stockage enterré ont permis de déterminer que l'aire de surface totale des tuyaux enfouis devrait être au moins égale à l'aire de surface du plancher de la serre (Sasaki et Itagi, 1979). L'aire de surface des tuyaux est elle-même déterminée par leur diamètre et leur espacement. Ces facteurs influencent aussi le volume d'air qui peut être transporté par les tuyaux. Après avoir considéré tous les paramètres, les chercheurs japonais sont arrivés à la conclusion que les tuyaux de 10 cm de diamètre intérieur étaient ceux qui convenaient le mieux.

Les tuyaux d'un entreposage de chaleur dans le sol ne sont pas soumis à beaucoup de pression, ni de la part de l'air, ni du sol environnant. Étant donné que les parois du tuyau n'ont pas besoin d'être très résistantes, des tuyaux d'égout ou de drainage bon marché font très bien l'affaire. Le matériau le moins cher sur le marché est le tube de drainage ondulé non perforé. Toutefois les ondulations augmentent considérablement le frottement entre l'air en mouvement et les parois du tuyau. Dans leur guide de conception détaillé sur les entreposages de chaleur dans le sol, Lawand et autres (1985) rapportent que le tuyau ondulé de 10 cm (diamètre intérieur) entraîne 3,2 fois plus de perte de pression que le tuyau lisse de même diamètre. En conclusion, cela signifie qu'il faut trois fois plus d'énergie pour déplacer un volume d'air équivalent dans un tuyau ondulé.

On pourrait penser que les tuyaux ondulés sont capables de transférer plus de chaleur au sol environnant que les tuyaux lisses à cause de leur plus grande aire de surface. Cependant, Sibley et Raghavan (1984) ont mesuré les coefficients d'échange de chaleur d'une quantité de tubes de drainage ondulés et ont trouvé que leurs coefficients avaient une amplitude semblable à celle des tuyaux lisses quoique légèrement inférieure. Des calculs ont démontré que les tuyaux ondulés et les tuyaux lisses transfèrent sensiblement la même quantité de chaleur globale pour un écoulement d'air donné.

Un des matériaux à tuyau lisse le meilleur marché est le tuyau de drainage en plastique ASTM 2729. Ce tuyau coûte 1,15 $ (dollars de 1986) plus cher le mètre que le tuyau de drainage ondulé. Une serre de 930 m² nécessite environ 3170 m de tuyau pour l'entreposage de chaleur dans le sol, avec une certaine marge de manoeuvre pour compenser les pertes. Si on choisit le tuyau ondulé, l'économie en coût de capital sera d'environ 3650 $.

Le surplus d'électricité nécessaire pour faire fonctionner les ventilateurs afin de compenser pour le frottement se chiffre à environ 245 $ par année. Par conséquent, les tuyaux lisses devraient se payer d'eux-mêmes sur une période de 15 ans et assurer des économies au niveau des frais d'exploitation pendant les 15 autres années de vie du système. Cependant, il faut aussi prendre en considération la difficulté de transporter des tuyaux rigides ainsi que la main-d'oeuvre additionnelle nécessaire pour faire leur installation dans le sol. Une fois tous ces facteurs bien considérés, il semble que les tubes de drainage ondulés de 10 cm de diamètre intérieur, non perforés, constituent le matériau par excellence pour le système de stockage thermique dans le sol. Étant donné que le tube perforé d'usage courant se remplit d'eau empêchant ainsi l'air de circuler, il serait préférable d'utiliser le tube non perforé avec les systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol.

Longueur, espacement, profondeur et pente des tuyaux

Lawand et autres (1985) recommandent l'utilisation de tuyaux mesurant entre 10 et 20 m pour obtenir une efficacité maximale avec l'entreposage de chaleur dans le sol. En conséquence, dans les serres mesurant plus de 20 m de long, la configuration du ventilateur, des chambres de distribution d'air et des tuyaux devrait être semblable à celle qui est décrite à la fig. 10. Si la serre mesure plus de 40 m, deux ensembles de systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol devraient être installés bout à bout.

Les ventilateurs peuvent soit aspirer l'air des tuyaux (dépression, fig. 10), soit y pousser l'air (surpression, fig. 1). Dans le premier cas, l'air entre dans les prises d'air qui se trouvent au-dessus des chambres de distribution d'extrémité et est ensuite évacué par les sorties qui se trouvent au-dessus du ventilateur monté sur la chambre centrale de distribution d'air (fig. 10). Ou bien l'air entre dans une prise qui se trouve au-dessus du ventilateur sur la chambre centrale de distribution et il est évacué par les sorties qui se trouvent au-dessus des chambres de distribution d'extrémité (non illustré).

Il n'est pas essentiel que le ventilateur se trouve situé sur la chambre centrale de distribution, non plus que l'emplacement des prises et des sorties d'air peut varier aussi. Il est possible de diminuer les ombres produites par les conduits en plaçant ces derniers dans les angles de la serre ou latéralement. Cependant, il est important, pour un maximum d'efficacité, que l'air soit distribué de façon uniforme. Il faut donc déterminer le nombre de conduits et leur emplacement de façon à obtenir une distribution d'air équilibrée. Dans les serres de type Venlo, la prise d'air n'a pas besoin d'être plus haute que les gouttières. Avec tous les systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol l'air évacué devrait être libéré au-dessus des cultures. Les tubes de convection perforés sont l'idéal pour faire la distribution de l'air évacué.

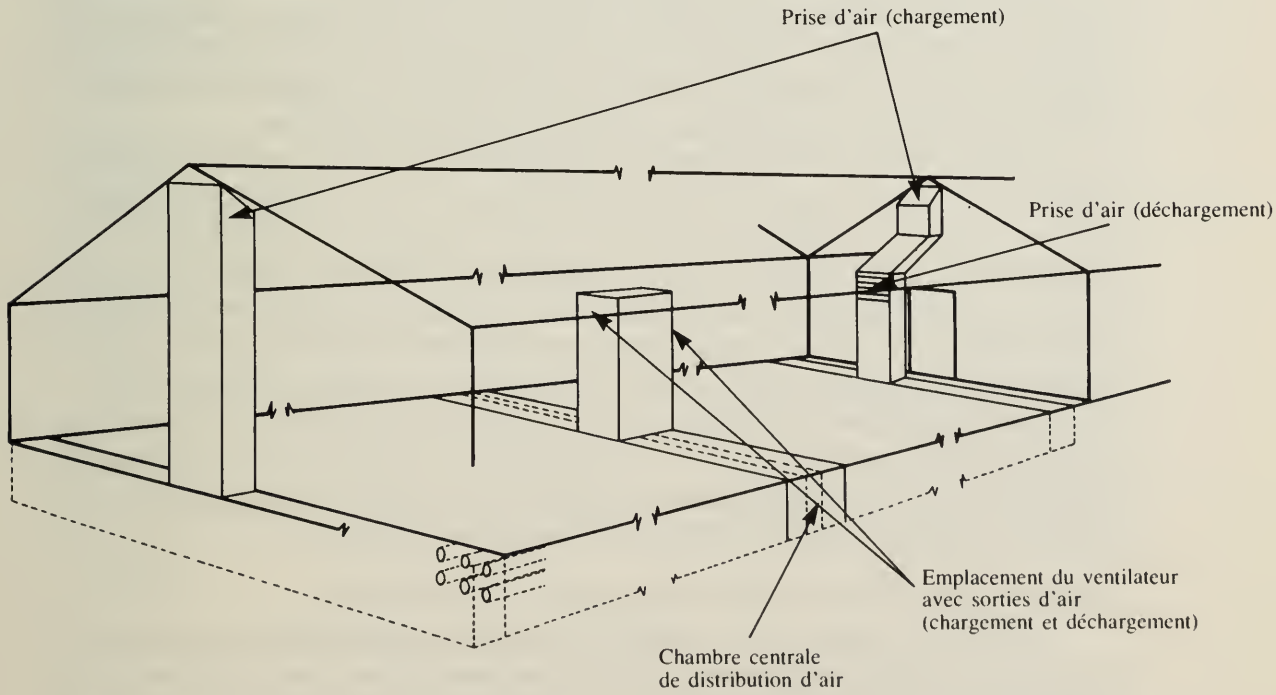


Fig. 10 *Système de chauffage à stockage enterré pour serres ordinaires mesurant plus de 20 m de long.*

Dans notre exemple de serre de 48 m de long, nous pouvons supposer que les chambres de distribution occuperaient approximativement 2 m de la longueur totale. Étant donné que les tuyaux ne devraient pas mesurer plus de 20 m de long, il faudra installer deux systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol bout à bout. Nous obtiendrons des longueurs individuelles de tuyau de 11,5 m, ce qui respecte les critères de conception spécifiés.

Lawand et autres (1985) ont établi que l'espacement minimal entre les tuyaux devrait être au moins de 40 à 60 cm, de centre à centre. En s'appuyant sur les résultats obtenus avec le système d'entreposage de chaleur dans le sol à Saanichton, les auteurs recommandent un espacement latéral des tuyaux de 55 cm. Cet espacement tient compte des exigences relatives à l'aire de surface des tuyaux telles que stipulées par Sasaki et Itagi (1979). Il garantit aussi que les tuyaux sont en nombre suffisant pour assurer la vitesse d'écoulement d'air requise tout en maintenant les coûts relatifs aux matériaux dans des limites raisonnables.

Même si notre serre modèle mesure 19,2 m de large, il faut laisser un espace d'environ 30 cm de centre à centre entre les poteaux et les tuyaux adjacents. Cet espace permet de laisser un dégagement pour les fondations en béton qui soutiennent les poteaux. Supposons qu'en plus des poteaux extérieurs il y a deux rangées internes de poteaux pour soutenir la ferme. La largeur efficace du stockage enterré va se trouver réduite de 1,8 m, ne laissant que 17,4 m d'espace utile.

Un espacement latéral des tuyaux de 55 cm va permettre d'installer 33 rangées de tuyaux si les rangées extérieures sont légèrement rentrées vers l'intérieur. Le nombre total de tuyaux dans ce système d'entreposage de chaleur dans le sol correspondra à 33 rangées × 2 couches × 4 longueurs de tuyau, pour un total de 264 tuyaux.

Les tuyaux devraient être installés à des profondeurs de 40 et 80 cm, de la surface du plancher jusqu'aux centres. Ces profondeurs satisfont les exigences minimales d'espacement et procurent une profondeur de stockage utile et adéquate d'environ 1 m. Par la même occasion, on réduit au minimum les frais d'installation et de creusage de tranchées.

Lorsque l'air est très chaud et très humide dans la serre et que la température du stockage est suffisamment basse, une condensation à partir de l'air risque de se produire dans les tuyaux d'entreposage de chaleur dans le sol. Pour faciliter l'évacuation du condensat, il faudrait installer les tuyaux avec une pente vers le bas de 0,5 % dans la direction de l'écoulement d'air. Le condensat va ensuite s'écouler dans le sol au fond de la chambre de distribution d'air où il sera évacué dans le système de drainage périphérique.

S'il n'y a qu'une seule chambre de distribution, comme sur la fig. 2, la direction de l'écoulement d'air et la pente du tuyau doivent être vers la chambre de distribution ; sinon, le condensat ne pourra pas s'écouler des tuyaux empêchant ainsi la déshumidification de l'air.

Vitesse de circulation d'air et dimension du ventilateur

Au fur et à mesure que la vitesse totale d'écoulement d'air augmente, la vitesse de transfert de chaleur dans les tuyaux augmente aussi, tout comme la quantité d'énergie disponible pour le stockage. Par conséquent, la capacité thermique et la vitesse de réponse du système d'entreposage de chaleur dans

le sol vont aussi s'améliorer. D'un autre côté, l'énergie nécessaire pour déplacer l'air augmente de façon exponentielle par une puissance trois au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement d'air augmente. Avec de plus grandes vitesses d'écoulement d'air, à partir d'un certain point, le rendement global du système commence à diminuer. En effet, si l'apport d'énergie nécessaire pour faire fonctionner le système solaire est excessif, les économies nettes d'énergie seront insuffisantes pour rentabiliser le système.

D'après Lawand et autres (1985), la vitesse optimale d'écoulement d'air dans les tuyaux est d'environ 2 m/s. En dépit de cette affirmation, ils rapportent que des vitesses de 5 m/s, ou plus, sont acceptables dans les systèmes à stockage enterré qui fonctionnent avec de plus petites longueurs de tuyaux (5 à 10 m) ou avec moins d'accessoires tels que les raccords coudés ou de transition qui occasionnent des pertes dynamiques importantes. Une vitesse de 2 m/s correspond à une vitesse d'écoulement d'air de 0,016 m^3/s par tuyau avec une perte de pression de 35 Pa, pour une longueur de 15 m.

Les recherches effectuées à Saanichton ont indiqué que le rendement du système d'entreposage de chaleur dans le sol est optimal lorsque la vitesse d'écoulement d'air est suffisante pour déplacer le volume total d'air qui se trouve dans la serre toutes les 9 minutes.

Si la serre de type Venlo qui fait l'objet de notre étude a des gouttières de 3 m de hauteur, alors le volume sera approximativement de 3130 m^3. La vitesse d'écoulement d'air totale devrait par conséquent être de 5,80 m^3/s, ce qui correspond à une vitesse de 0,022 m^3/s dans chacun des 264 tuyaux. La vitesse de l'air dans le tuyau est de 2,7 m/s. Cela peut sembler excessivement rapide, mais les longueurs de tuyau ont presque la dimension minimale recommandée. Le calcul de la perte de pression va déterminer si la conception est adéquate. En utilisant les méthodes décrites dans le ASHRAE handbook, *Fundamentals* (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning, 1981) ainsi que les données fournies par Carson et autres (1980), nous avons établi une perte de pression de 50 Pa. Dépendant de la forme des bouches d'entrée, des bouches de sortie et des raccords de transition entre les tuyaux et les chambres de distribution de l'air, ainsi que du nombre de coudes, la perte de pression totale peut se situer quelque part entre 100 et 150 Pa.

Notre modèle établi par calcul nécessite l'utilisation de deux ventilateurs capables de déplacer chacun 2,9 m^3/s en dépit de la perte de pression totale. Ces ventilateurs sont actionnés chacun par un moteur d'une puissance de 1,87 kW. Les études effectuées à Saanichton ont indiqué qu'une serre de 930 m^2 qui fonctionne avec un ventilateur solaire nécessitant un apport d'énergie de 3,7 kW est économique à l'usage (voir Frais d'exploitation et rendement sur une base annuelle, p. 24). Lors de la conception d'un système d'entreposage de chaleur dans le sol, il faudra déterminer avec soin les pertes de pression du système conformément aux méthodes recommandées par ASHRAE.

Chambres de distribution d'air et conduits

Les chambres de distribution devraient être construites en contreplaqué traité sous pression et en 2″ × 4″ (5 × 10 cm) et devraient couvrir toute la largeur de la serre. Les couvercles devraient être bien scellés pour éliminer

les fuites d'air. Il n'est pas à conseiller de fermer le fond des chambres de distribution parce que cela empêcherait le condensat des tuyaux de s'écouler.

Les conduits sont habituellement construits en contreplaqué avec une bande de solin de 10 cm et devraient être peints en blanc pour que la lumière soit réfléchie sur les cultures.

Le système d'entreposage de chaleur dans le sol doit disposer d'un réseau de chambres de distribution et de conduits qui ait un fonctionnement aérodynamique efficace et sans à-coups. Les détails de sa configuration, les points d'intersection de ses composantes et leurs dimensions devraient être vérifiés par un expert. Il est impossible qu'un système d'entreposage de chaleur dans le sol fonctionne de façon économique si les pertes de pression causées par l'écoulement d'air sont excessivement élevées.

Isolation du périmètre souterrain

Étant donné que la chaleur stockée ne se propage pas très loin au-dessous des tuyaux de la couche inférieure, il n'est pas nécessaire d'installer un matériau isolant sous le stockage. Par contre, la chaleur se déplace latéralement du stockage vers le sol extérieur plus froid. Pour empêcher les pertes de chaleur au profit du sol environnant, il faut isoler le périmètre souterrain jusqu'à une profondeur de 1,2 m. Cet isolant va également servir à protéger les fondations des poteaux contre le gel. Le matériau choisi pour isoler devrait avoir un coefficient de résistance d'au moins Rsi = 0,9 m^2 °C/W (R = 5 pi^2 h °F/BTU), mais il peut être rentable d'installer jusqu'à Rsi = 2,6 m^2 °C/W (R = 15 pi^2 h °F/BTU) (Towning et Turkewitsch, 1981). Le coût de l'excavation est compris si l'isolant est installé soit dans la tranchée périphérique d'assèchement, soit dans les tranchées extérieures des tuyaux.

Frais d'installation

L'ensemble des coûts d'installation d'un système d'entreposage de chaleur dans le sol semblable à celui décrit à la figure 10 dans une serre de 930 m^2, à simple chapelle, sont d'environ 11,40 $/$m^2$ (dollars de 1985). Les coûts en main-d'oeuvre pour faire l'installation des tuyaux, ventilateurs et raccords électriques sont inclus. Par contre, il est entendu que les producteurs vont utiliser leur propre main-d'oeuvre pour constuire les conduits.

Frais d'exploitation et rendement sur une base annuelle

Le système expérimental d'entreposage de chaleur dans le sol utilisé à Saanichton a permis de réduire les besoins en chauffage d'une serre de dimension commerciale de 25,1 % sur une base annuelle, par rapport à une construction témoin identique. Toutefois, la consommation d'énergie électrique a été 33,6 % plus élevée en raison des besoins énergétiques du ventilateur solaire. Cela se traduit par une économie d'énergie totale de 22,1 %, en autant que le rapport entre l'énergie calorifique et les besoins en énergie électrique de la serre témoin soit de 19,25:1.

Agriculture Canada a fait parvenir à Arcus Consulting Limited (firme indépendante spécialisée en économie agricole) toutes les données expérimentales disponibles sur les coûts en capital et les coûts d'exploitation. Cette dernière a fait un relevé des coûts et des bénéfices, sur une base annuelle, à

partir des estimations des coûts annuels d'entretien et de réparation qui ont été fournies par les chercheurs de Saanichton. Le coût du propane a été évalué à 0,2275 $/L et le rendement global du système de chauffage à eau chaude ordinaire a été établi à 75 %. Les coûts en électricité sélectionnés étaient de 0,0619 $/kWh pour les premiers 550 kWh consommés par mois et de 0,0431 $/kWh pour toute consommation mensuelle additionnelle.

Analyse économique

Arcus Consulting Limited (1985) a déterminé la valeur actualisée nette ainsi que le rapport des coûts et bénéfices pour le système d'entreposage de chaleur dans le sol. Ces rapports sont les suivants 1,8, 1,4 et 1,1 pour des taux d'intérêt de 5, 10 et 15 %. Le taux de rendement interne a été estimé à 18 % par an.

Les résultats ont démontré que le système d'entreposage de chaleur dans le sol a un potentiel de rentabilité à l'un ou l'autre des trois taux d'intérêt en autant que le rendement mesuré est le même que celui qui l'a été à Saanichton. Mais la technique sera vraisemblablement plus rentable si les taux d'intérêt sont bas.

L'analyse a été répétée en supposant cette fois que le combustible fossile utilisé était le mazout no 2 au prix de 0,2690 $/L. Dans cette analyse, le rendement global du système de chauffage ordinaire a été établi à 65 %. Avec le mazout, les rapports des coûts et bénéfices sont 3,5, 2,7 et 2,2 respectivement pour chacun des taux d'intérêt. Le taux de rendement interne est alors de 55 % par an.

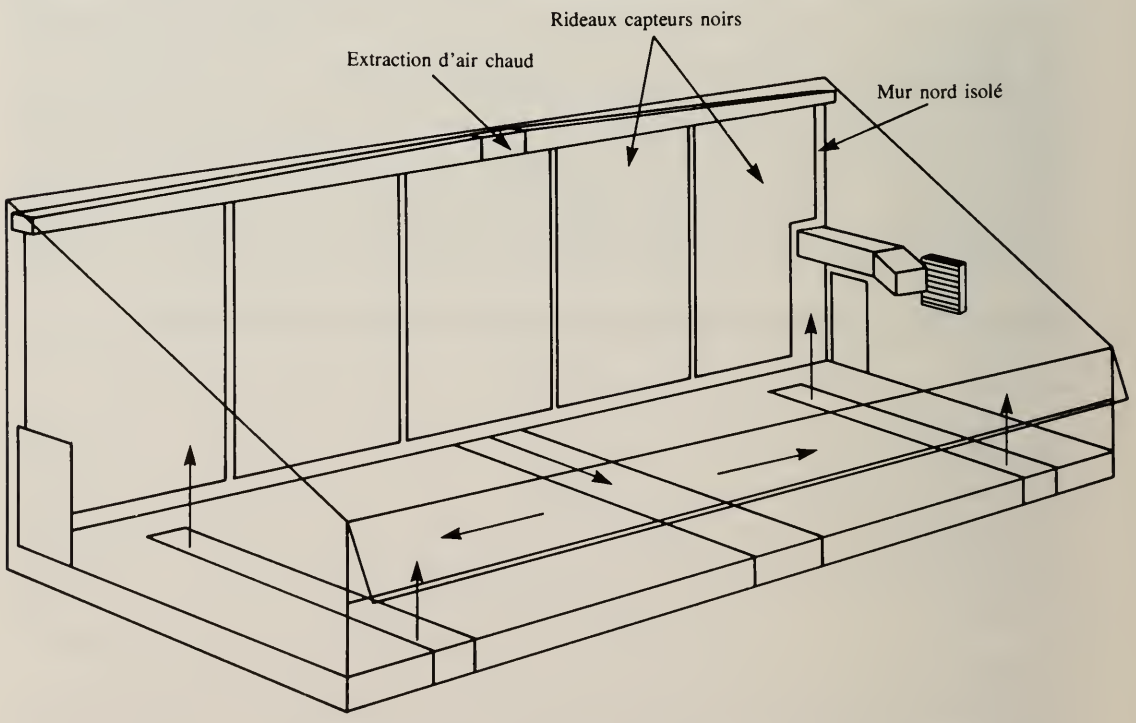
La firme Arcus Consulting Limited a aussi tenté d'évaluer s'il était rentable d'installer un système de chauffage à entreposage de chaleur dans le sol dans une serre tunnel non chauffée en polyéthylène double épaisseur où les plants sont cultivés directement à même le sol. Elle est arrivée à la conclusion que le système n'est pas rentable, quelles que soient les conditions, si on calcule les avantages sur la base d'une production accrue de légumes résultant des effets de températures plus élevées pendant la nuit, d'une période de culture plus longue et du chauffage des racines. Nous ne disposons pas d'analyse économique des systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol dans des serres tunnels chauffées en polyéthylène double épaisseur qui s'appuierait seulement sur les économies d'énergie.

Système de chauffage solaire dans une demi-serre

Description

La demi-serre solaire (fig. 11) a été conçue pour les latitudes nord au-delà de 52 °, où le soleil est plus près de l'horizon et les hivers très rigoureux. La structure orientée selon un axe est-ouest est constituée de la moitié d'une charpente de serre ordinaire en acier galvanisé et aluminium avec un mur nord vertical isolé. Étant donné que la configuration qui en résulte coûte cher à construire, est très étroite sur la largeur et fait de l'ombre au nord, elle est d'une application limitée. Elle ne peut être installée qu'au cours de la construction initiale d'une serre. Par conséquent, elle n'est pas décrite ici de façon aussi détaillée que le système d'entreposage de chaleur dans le sol.

La demi-serre offre une plus grande surface vitrée par rapport à la surface de plancher qu'une structure ordinaire. Par conséquent, il permet une transmission lumineuse à l'intérieur de 30 à 45 % supérieure par unité de surface de plancher, selon le mois (Lau et autres, 1984). Un mur nord isolé va



Flèches indiquant le sens d'écoulement de l'air pendant le chargement.

Fig. 11 *Schéma d'un système de chauffage pour les demi-serres non jumelées.*

permettre de réduire les charges thermiques de 15 % par rapport à une serre ordinaire non isolée de même surface.

Des capteurs solaires constitués de panneaux en polyéthylène renforcé recouverts d'une peinture noire mate au latex pour les rendre plus absorbants sont suspendus devant le mur isolé. Ils sont fixés à un dispositif d'enroulement qui est lui-même attaché à une prise d'air chaud dans le faîte et sont conçus pour être enroulés et déroulés, selon les besoins en chaleur et la hauteur des cultures. La surface intérieure du matériau isolant le mur nord est recouverte d'une peinture blanche d'intérieur au latex au fini luisant. Cette peinture protège l'isolant en polystyrène alors que les autres types de peinture risquent d'entraîner la corrosion du matériau isolant. Lorsque les panneaux isolants sont enroulés, la surface blanche est conçue pour réfléchir la lumière sur les cultures et aussi pour réfléchir l'excès de rayonnement à l'extérieur de la serre (fig. 12). La peinture réfléchissante augmente aussi le

Fig. 12 *Mur nord isolé dans une demi-serre. Les capteurs solaires, qui sont suspendus à un dispositif d'enroulement, sont ici enroulés pour réfléchir la lumière.*

rendement des panneaux-capteurs solaires lorsqu'ils sont déroulés parce que la lumière qui passe autour des panneaux est réfléchie sur l'intérieur de la surface des capteurs solaires.

La pente verticale des capteurs solaires donne les meilleurs résultats au printemps et en automne parce qu'à cette période les rayons du soleil frappent les panneaux à un angle inférieur. Les panneaux chauffent l'air qui les environne de chaque côté, jusqu'à ce que l'air s'élève de lui-même vers le faîte.

Un gros ventilateur électrique de type centrifuge aspire l'air chauffé dans le conduit et le transporte jusqu'au stockage passif sur lit de cailloux situé dans le sol, sous le plancher de la serre (fig. 13). L'air est ensuite poussé à travers les vides entre les cailloux qui absorbent la chaleur. L'air rafraîchi et déshumidifié est ensuite retourné à l'intérieur de la serre. Si la température de l'air qui est évacué du stockage passif atteint celle de la bouche d'entrée d'air, cela signifie que le stockage est complètement chargé. Le ventilateur solaire ne devrait pas fonctionner de nouveau en position de chargement avant qu'une partie de la chaleur accumulée n'ait été récupérée dans le stockage.

La chaleur stockée devrait être libérée la nuit en inversant le sens d'écoulement d'air à l'aide de volets de réglage motorisés situés dans les conduits autour du ventilateur (fig. 14). Les stockages sur lit de cailloux développent des stratifications longitudinales de température pendant le chargement. Contrairement au stockage enterré, la région qui se trouve près du point où l'air chaud entre devient plus chaude que la partie opposée. L'inversion de l'écoulement d'air pendant le déchargement permet à l'air

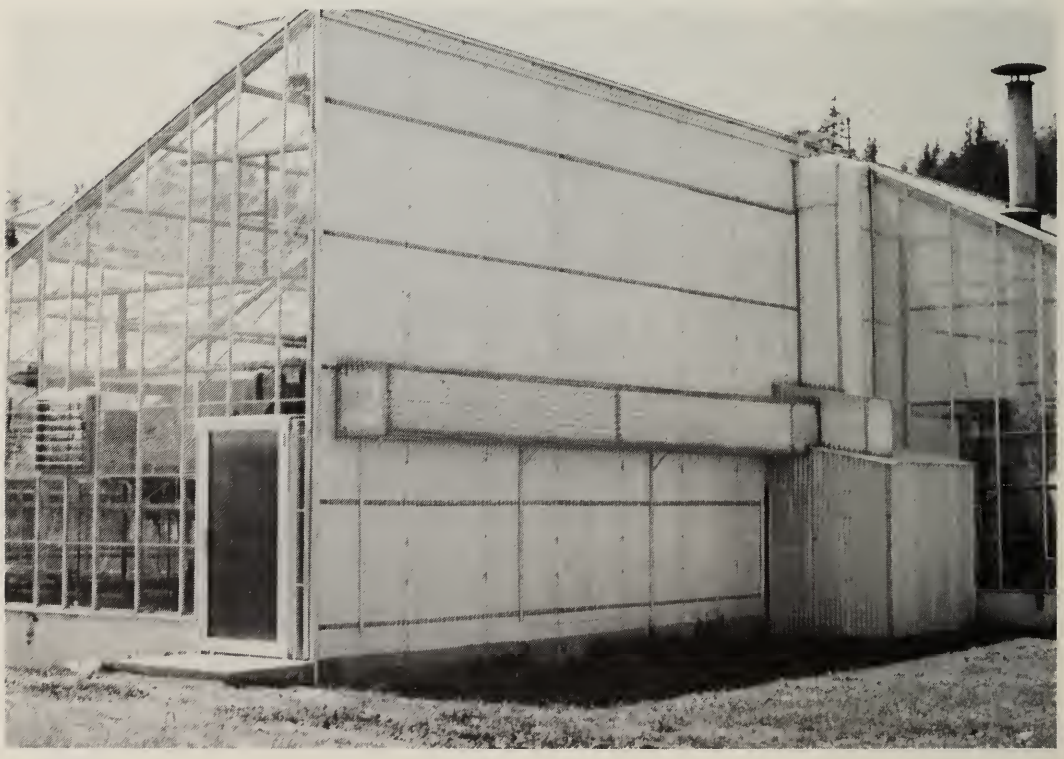


Fig. 13 *Mur nord isolé et ventilateur solaire.*

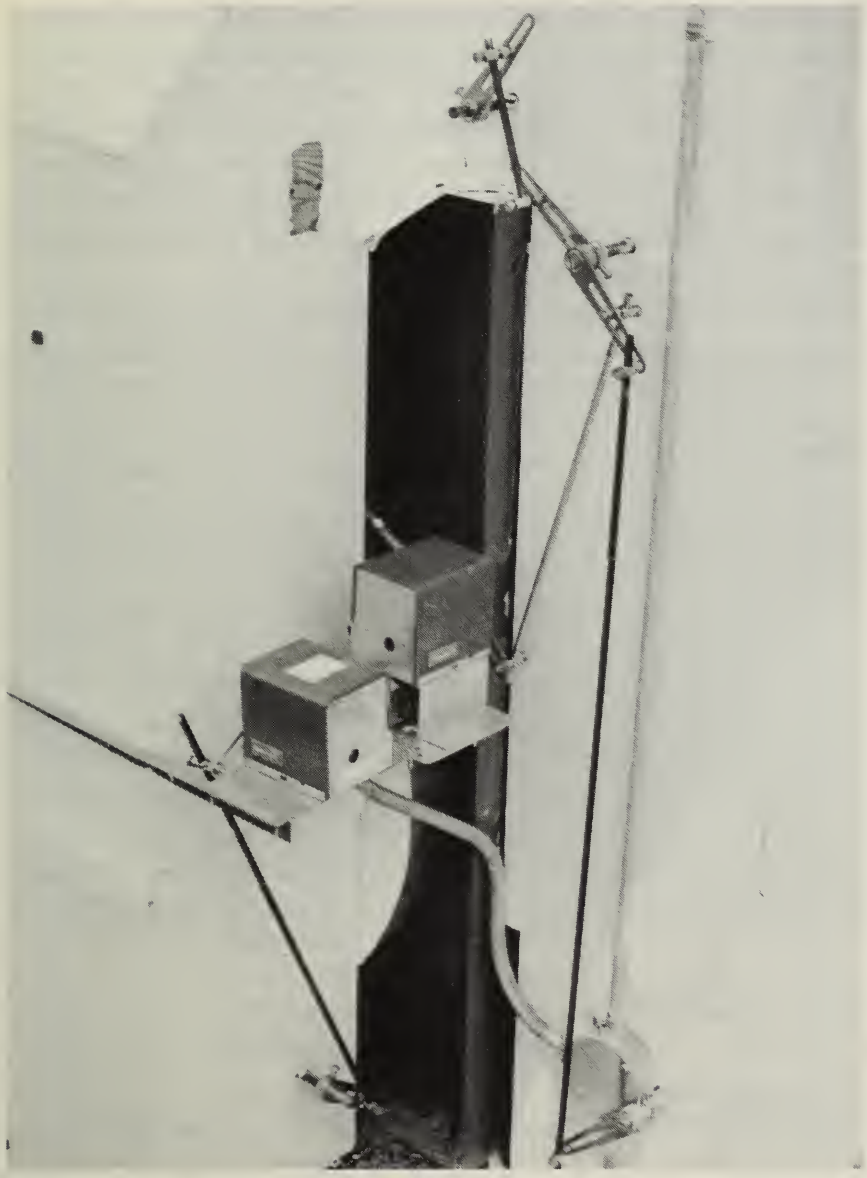


Fig. 14 *Volets de réglage motorisés pour l'inversion du sens d'écoulement d'air.*

ayant circulé de passer à travers les cailloux les plus chauds avant d'être réintroduit dans la serre. Cela permet à la chaleur stockée d'atteindre la température la plus élevée possible. Si la température de l'air évacué tombe au-dessous de la température ambiante, il faudrait fermer le ventilateur solaire jusqu'à ce que de la chaleur soit de nouveau recueillie.

Applications

Le système de chauffage solaire dans les demi-serres n'est compatible qu'avec une orientation selon un axe est–ouest. Le matériau de couverture ne doit pas diffuser la lumière transmise parce que les panneaux capteurs ne fonctionnent efficacement qu'avec un rayonnement direct. Par conséquent, le seul matériau de couverture pratique est le vitrage simple.

Les expériences effectuées à Saanichton ont démontré que les capteurs solaires de la demi-serre étaient capables de recueillir beaucoup plus de

chaleur que les stockages thermiques sur lit de cailloux situés sous son plancher ne pouvaient en contenir. À une échelle commerciale, le système n'est rentable que si la demi-serre est jumelée au sud à une autre serre orientée selon un axe est-ouest, cette dernière étant une serre à simple chapelle renfermant des stockages thermiques sur lit de cailloux additionnels sous son plancher (fig. 15). Par l'addition d'une structure jumelée, on applique le coût du mur nord isolé, des capteurs et du ventilateur solaire à trois fois la surface de plancher de la demi-serre.

La pression d'air dans les stockages thermiques sur lit de cailloux doit être très forte de façon à pousser l'air à travers les espaces vides. Afin d'en assurer l'étanchéité, les stockages thermiques sur lit de cailloux devraient être recouverts d'une pellicule de polyéthylène avant de mettre en place le plancher. Le polyéthylène empêche aussi le surplus de l'eau d'irrigation de s'infiltrer dans le stockage. Une couche de 10 cm de fin gravier ou de sable grossier est suffisante pour tenir le polyéthylène en place. Une autre solution consiste à couler sur place un plancher en béton.

La ventilation naturelle au moyen d'un ouvrant en toiture ne donne pas de bons résultats avec les demi-serres solaires. D'abord parce qu'un ouvrant en toiture est incapable de fournir un rendement suffisant pour rafraîchir l'air étant donné qu'une partie de l'air extérieur est aspiré dans la prise d'air située dans le faîte. Par ailleurs, les courants descendants qui en résultent nuisent au mouvement ascensionnel passif de l'air chaud à partir du capteur solaire. La meilleure méthode de ventilation consiste à installer un système de convection à ventilateur soufflant au-dessus des cultures, avec des volets de réglage à chaque extrémité pour permettre à l'air extérieur de s'écouler à

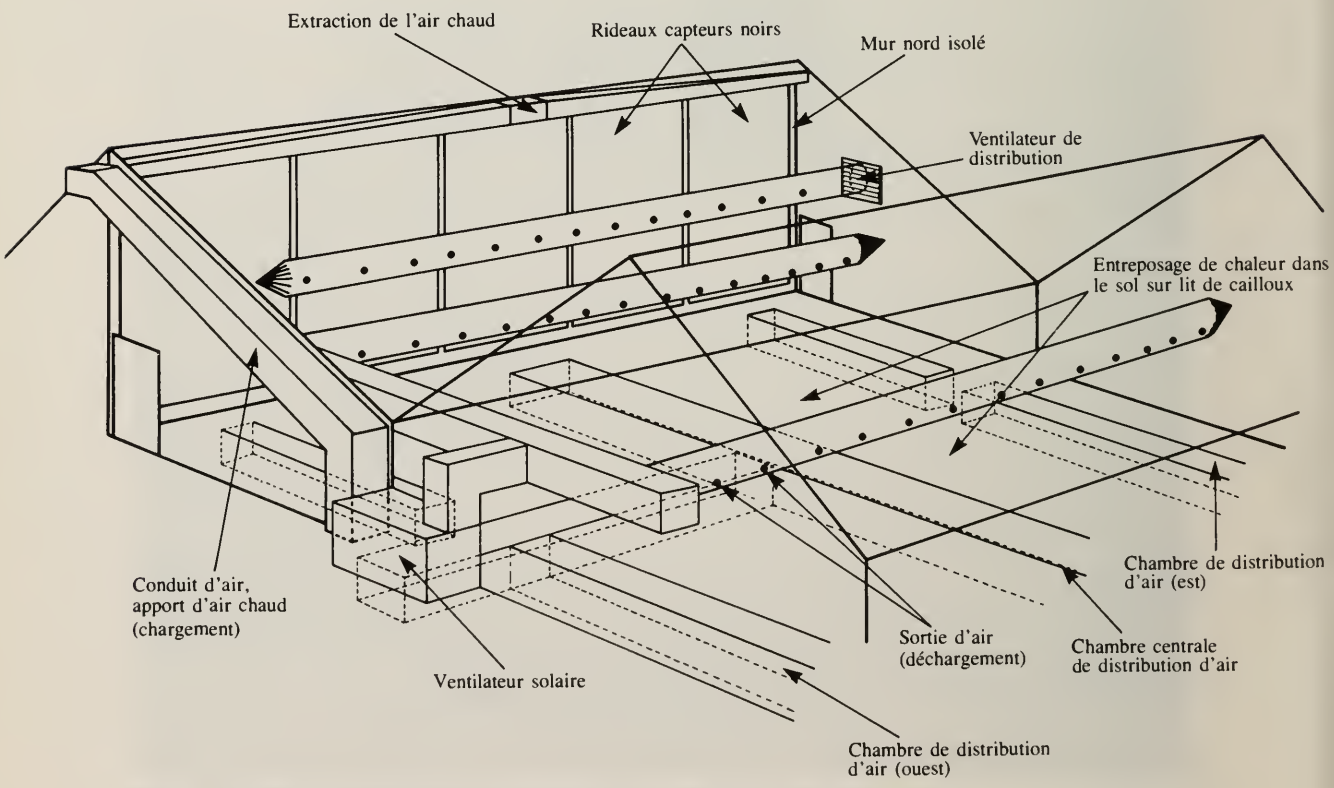


Fig. 15 *Schéma du système de chauffage pour des demi-serres jumelées.*

travers la serre. L'air chaud récupéré des stockages sur lit de cailloux peut être amené par des conduits à l'intérieur d'un dispositif de chauffage chaque fois que le chauffage solaire est nécessaire. Une autre méthode consiste à installer des ventilateurs aspirants munis de volets de réglage. Même si les ventilateurs aspirants avec des volets ne distribuent pas la chaleur solaire, ils sont néanmoins utiles si des tampons de refroidissement par évaporation sont nécessaires pour maintenir des températures acceptables dans la journée. En outre, un ventilateur solaire aura suffisamment de puissance pour distribuer l'air chauffé par énergie solaire qui est évacué vers le bas par un tube de convection perforé si le système de climatisation a été bien conçu, éliminant ainsi la nécessité d'avoir un ventilateur soufflant.

Directives de conception

La dynamique de l'écoulement de l'air dans les stockages sur lit de cailloux est très complexe et dépend de nombreux facteurs importants tels que le débit d'air en circulation, la grosseur moyenne des cailloux, la proportion d'espaces vides ainsi que la dimension des stockages eux-mêmes. En conséquence, il est impossible de fournir des directives de conception telles que celles dont nous avons fait état pour les systèmes d'entreposage de chaleur dans le sol. Les lecteurs qui désirent des explications sur les principes de l'écoulement de l'air devraient consulter les publications du Conseil national de recherches du Canada (1979, 1980 et 1981 *a*).

Le débit d'air en circulation est déterminé par les caractéristiques du rayonnement solaire disponible sur le site ainsi que par les dimensions de la demi-serre et son capteur solaire. Il faudrait effectuer une analyse mois par mois du rendement anticipé du capteur solaire conformément aux principes décrits par le Conseil national de recherches du Canada (1977). La forme du conduit et les dimensions du ventilateur sont déterminés à partir des directives publiées dans le ASHRAE handbook, *Fundamentals* (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, 1981).

Les conduits peuvent être construits avec les mêmes matériaux que pour le système d'entreposage de chaleur dans le sol (contreplaqué et bande de solin de 10 cm) et devraient aussi être peints en blanc pour réfléchir la lumière du soleil. Les chambres de distribution de la serre expérimentale de Saanichton sont faites de blocs de béton. Étant donné que les parois extérieures des chambres de distribution qui se trouvent aux extrémités des stockages doivent être étanches à l'air, les blocs sont posés les uns sur les autres de la façon habituelle. Par contre, les parois internes des chambres de distribution qui se trouvent aux extrémités des stockages doivent être percées de grands orifices pour laisser passer l'air et être suffisamment fortes pour résister à la charge latérale imposée par les lits de cailloux. C'est pourquoi les blocs y sont posés sur le côté et leurs surfaces intérieures sont recouvertes de deux épaisseurs de treillis en acier de 13 mm pour empêcher les cailloux d'y tomber (fig. 16).

Le dessus, le fond et les côtés des stockages sur lit de cailloux ainsi que le mur nord devraient être isolés à l'aide d'un matériau possédant un coefficient de résistance d'au moins Rsi = 0,9 m^2 °C/W (R = 5 pi^2 h °F/BTU). La mousse de polystyrène extrudé convient parfaitement pour cet usage. Le

stockage sur lit de cailloux devrait aussi être scellé avec un coupe-vapeur en polyéthylène de 0,15 mm. La surface extérieure du mur nord peut être recouverte d'un matériau bon marché facile à installer comme la fibre de verre.

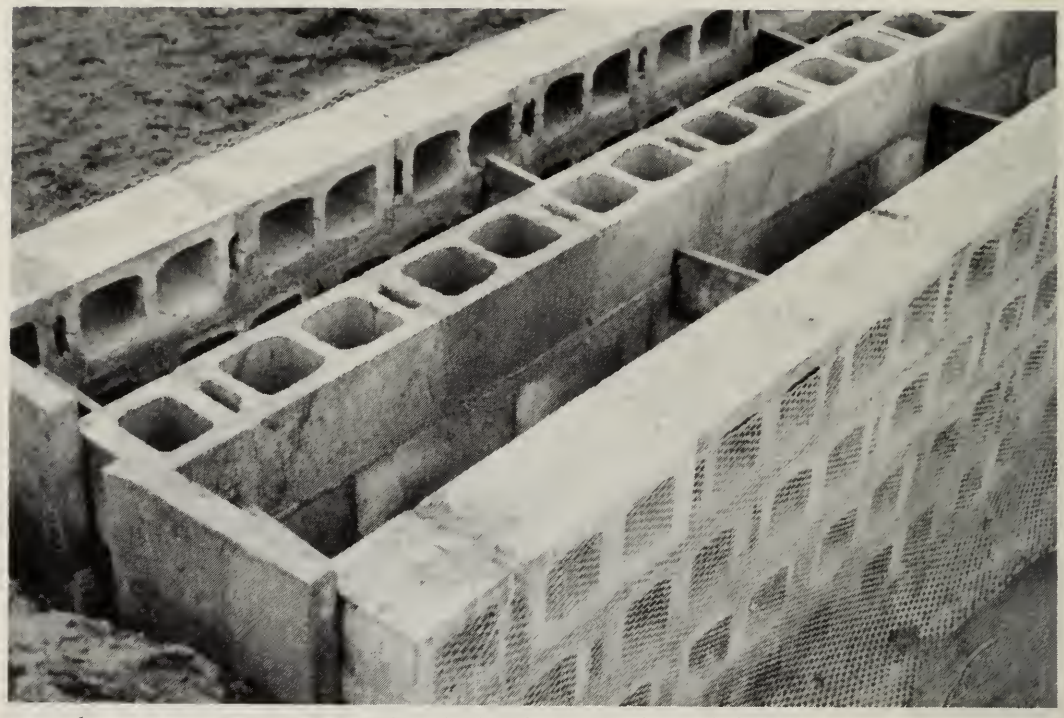


Fig. 16 *Construction d'une chambre de distribution en blocs de béton.*

Frais d'installation

Les frais d'installation d'une demi-serre solaire de 945 m² jumelée à une serre à simple chapelle sont d'environ 35,00 $/m² (dollars de 1985). La demi-serre solaire est censée être la moitié d'une serre standard de 12,8 m × 54,9 m. La serre jumelée mesure 10,8 m × 54,9 m.

Frais d'exploitation et économies d'énergie sur une base annuelle

Au cours des essais effectués à Saanichton, la demi-serre solaire a utilisé 47 % moins d'énergie calorifique et 73,1 % plus d'électricité qu'une serre ordinaire, ce qui donne une économie d'énergie globale de 40,3 %.

Agriculture Canada a fourni à *Arcus Consulting Limited* les données expérimentales sur les coûts et les économies d'énergie. La firme a établi les coûts annuels en utilisant la même méthode que celle qui avait été appliquée au système de stockage enterré.

Analyse économique

Les rapports des coûts et bénéfices pour la demi-serre solaire de 945 m² jumelée et chauffée au gaz naturel sont les suivants : 1,3, 1,0 et 0,7 respectivement pour des taux d'intérêt de 5, 10 et 15 %. Le taux de rendement interne de cette technique est de 9 % par an. Les résultats indiquent qu'en utilisant ce combustible fossile, le système de la serre solaire ne pourra être rentable qu'avec un taux d'intérêt de 5 %.

La technique a une valeur actualisée nette supérieure, un meilleur rapport des coûts et bénéfices et un meilleur taux de rendement interne lorsque le mazout no 2 est utilisé pour le chauffage. En effet, avec ce dernier combustible, le système était rentable avec les trois taux d'intérêt examinés. Les rapports des coûts et bénéfices observés furent 2,5, 1,8 et 1,4 respectivement et le taux de rendement interne a augmenté jusqu'à 25 % par an.

En dépit du fait que la demi-serre solaire est capable de générer des économies d'énergie beaucoup plus significatives que le système de stockage enterré, ses coûts en capital plus élevés diminuent son potentiel économique. Pour de nombreuses raisons, le système de chauffage à entreposage de chaleur dans le sol convient mieux aux applications commerciales.

Système de chauffage à stockage à eau

La capacité thermique de l'eau est 2,8 fois supérieure à celle des cailloux et équivaut à celle du sol humide. Toutefois, les systèmes solaires qui utilisent l'eau comme fluide caloporteur sont coûteux, ce qui restreint leur utilisation dans les serres commerciales. Les grands capteurs solaires doivent être situés à l'extérieur de la serre ce qui pose des problèmes avec les serres jumelées. Ces systèmes sont aussi souvent affligés du problème de fuites dans les raccords.

Dans plusieurs projets de recherche, des capteurs solaires extérieurs ont été utilisés avec des stockages à eau chaude dans des réservoirs isolés. Il a été établi que le rapport entre la surface du capteur solaire et la surface de plancher de la serre devait être de 1:1 pour obtenir des économies d'énergie significatives. Les investissements élevés nécessaires pour installer un tel système ainsi que le prix élevé du site occupé par les capteurs solaires ne sont pas compensés par les économies réalisées. La période de récupération se situe entre 15 et 20 ans.

Les étangs solaires sont constituées de bassins ouverts qui font simultanément le captage et le stockage de l'énergie solaire en absorbant les rayons du soleil. Ces bassins peuvent être installés à l'intérieur d'une serre mais la surface de plancher qu'ils occupent ne pourra pas être utilisé pour cultiver. Les obstacles créés par les bassins solaires à l'intérieur contribuent aussi à rendre le transport des plantes difficile.

Des bidons ou autres récipients peuvent être remplis d'eau et empilés contre un mur nord isolé où ils sont exposés aux rayons du soleil (fig. 17). Ils absorbent la chaleur pendant la journée. La nuit venue, la chaleur accumulée est retournée par conduction à l'intérieur de la serre. Même si cette simple application du chauffage solaire ne génère des économies d'énergie significatives que dans de petites serres, son faible coût peut la rendre rentable.

Fig. 17 *Bidons d'eau servant de stockage thermique dans une petite serre.*

Système de réglage d'ambiance pour les serres solaires

Afin d'assurer une efficacité optimale des systèmes de chauffage solaires, le système de réglage d'ambiance doit être sensible aux variations d'équilibre thermique dans la serre. Les températures demandées doivent être maintenues peu importe la méthode de chauffage utilisée dans la serre.

Les serres qui sont chauffées par une combinaison de deux systèmes de chauffage différents doivent être équipées de dispositifs de réglage d'ambiance perfectionnés pour pouvoir fonctionner efficacement. Les systèmes solaires ont une efficacité maximale lorsque les appareils de ventilation et de refroidissement ainsi que la première et la deuxième phase du chauffage démarrent à la bonne température. La séquence de fonctionnement de ces systèmes doit être établie correctement. Pour permettre de mieux comprendre des séquences de fonctionnement possibles, nous décrivons diverses étapes à suivre pour une serre caractéristique à entreposage de chaleur dans le sol. Nous supposons que les températures demandées sont 18 °C durant le jour et 21 °C pendant la nuit.

La première phase de refroidissement démarre lorsque la température de l'air ambiant s'élève au-dessus de la température demandée. À environ 23 °C le ventilateur solaire commence à fonctionner ce qui entraîne l'extraction de l'air chaud par les conduits. La température ambiante se stabilise lorsque les conditions climatiques le permettent.

La deuxième phase de refroidissement démarre lorsqu'un accroissement du rayonnement solaire occasionne une élévation encore plus poussée de la température de l'air ambiant. À environ 25 °C l'ouvrant latéral va s'ouvrir suivi de l'ouvrant en toiture. Dans les cas où les serres sont jumelées, les ventilateurs aspirants sont mis en marche de façon séquentielle. Des dispositifs de réglage plus perfectionnés arrêtent le chargement si la température de l'air à la bouche d'entrée tombe au-dessous de la température du sol. Cette situation se produit parfois après plusieurs jours très ensoleillés au cours desquels les stockages atteignent la température maximale. Lorsqu'il sert au chauffage, il faut verrouiller le fonctionnement du ventilateur solaire si les stockages thermiques sont vides et ce, jusqu'à ce que de la chaleur soit à nouveau stockée.

Le ventilateur solaire ne fonctionne pas lorsque la serre est à la température demandée et il ne va commencer à extraire la chaleur des stockages que si la température ambiante tombe de plus de 1,5 °C au-dessous de la température demandée. Si la température tombe d'un autre 1,5 °C, le système de chauffage ordinaire va démarrer.

Conclusion

Dans certaines régions du Canada où les conditions climatiques sont favorables, une serre avec un système d'entreposage de chaleur dans le sol pourrait être rentable d'après les résultats des recherches effectuées par Agriculture Canada à la station de recherche de Saanichton en Colombie-Britannique. Cette technique convient à toute serre nouvelle, peu importe sa structure, sa couverture ou son orientation. Elle peut facilement être installée après coup dans des serres déjà construites pourvu qu'elles n'aient pas un plancher en béton. Le producteur qui envisage d'utiliser cette technique devrait étudier attentivement le contenu de la présente brochure avant de commencer. Un ingénieur agricole devrait approuver la conception d'un système de chauffage solaire parce que cette dernière est cruciale pour obtenir un fonctionnement efficace.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes qui ont apporté leur contribution à la présente publication :

Le docteur Ed van Zinderen Bakker de la Station de recherche et de quarantaine des plantes de Saanichton, Agriculture Canada, Sidney, Colombie-Britannique pour avoir effectué des recherches visant à déterminer les effets du chauffage solaire sur la croissance des plantes et pour avoir tenu à jour le système informatisé d'acquisition des données de contrôle ; M. Chris Dyble de B.C. *Hydro and Power Authority*, pour avoir pris les ententes nécessaires pour que des compteurs électriques appartenant au service public soient prêtés aux chercheurs ; M. Henk Grasmeyer de *Frank Jonkman & Sons Ltd.* pour ses judicieux conseils sur la conception des serres ; Mme Peggy Watson de la Station de recherche et de quarantaine des plantes de Saanichton, Agriculture Canada, Sidney, Colombie-Britannique, pour nous avoir aidé à obtenir du matériel de recherche ; M. Norman Dressler du Service de l'environnement atmosphérique à l'aéroport international de Victoria, Colombie-Britannique, pour nous avoir fourni des données météorologiques ; M. Bob Duncan de Victoria, Colombie-Britannique, pour nous avoir permis de photographier ses installations, et M. George Lechleiter de *Greenwood Indoor Plants Ltd.*, Surrey, Colombie-Britannique pour nous avoir donné son point de vue de producteur avec ses nombreuses suggestions utiles et ses critiques constructives.

Bibliographie

Arcus Consulting Limited. 1985. An economic evaluation of three new greenhouse technologies. Prepared for Agriculture Canada, Regional Development Branch, Vancouver, B.C.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 1981. ASHRAE Handb. Fundamentals. New-York, NY.

Blom, T.; Ingratta, F.; Hughes, J. 1982. Energy conservation in Ontario greenhouses. Ont. Minist. Agric. Food Publ. 65. 24 pp.

Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1982*a*. Normales climatiques au Canada. Vol. 1. Rayonnement solaire.

Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1982*b*. Normales climatiques au Canada. Vol. 7. Insolation effective.

Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1982*c*. Normales climatiques au Canada. Vol. 4. Degrés-jours.

Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1982*d*. Normales climatiques au Canada. Vol. 3. Précipitations.

Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1982*e*. Normales climatiques au Canada. Vol. 5. Vent.

Carson, W.M.; Watts, K.C.; Desir, F. 1980. Design data for air flow in plastic corrugated drainage pipes. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.) 23(2): 409–413.

Darby, D. 1982. Greenhouse heating requirements: Calculating heat loss. Alberta Agriculture, Print Media Branch. Agri-fax. (Agdex 731-1).

Flowers Canada Inc. 1983. A design standard guideline for Canadian greenhouses. Guelph, Ont. 32 pp.

Jackson, H.A. 1983. Solar energy in Canadian agriculture. Agric. Can. Eng. Stat. Res. Inst. Contrib. I-569. 90 pp.

Kadulski, R.; Lyster, E.; Lyster, T. Solplan 3. The Drawing Room Graphic Services Ltd., Vancouver, B.C. 60 pp.

Lau, A.K.; Staley, L.M.; Monk, G.J.; Molnar, J.M. 1984. Solar radiation transmission in greenhouses. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.) Pap. 84-4535.

Lawand, T.A.; Coffin, W.; Alward, R.; Chagnon, R. 1985. Design guide for underground heat storage. Agriculture Canada Research Station, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec. Tech. Bull. 21.

Mastalerz, J.W. 1977. The greenhouse environment. New York, NY: John Wiley & Sons.

Molnar, J.M.; Monk, G.; Staley, L.M. 1983. Greenhouse energy conservation studies at the Saanichton Research and Plant Quarantine Station. Presented to the 1983 Ornamentals North West Seminars, Oregon.

Monk, C.J.; Staley, L.M.; Molnar, J.M.; Thomas, D. 1983. Design, construction and performance of two earth thermal storage solar greenhouses. Can. Soc. Agric. Eng. Pap. 83-405.

National Greenhouse Manufacturers Association. 1981. Standards: Design loads in greenhouse structures: Ventilating and cooling greenhouses: Greenhouse heat loss. Saint Paul, MN. 51 pp.

National Research Council of Canada. 1977. Solar energy program: In ground heat storage. Sol. Energy Proj. Rep. STOR-5. 33 pp.

National Research Council of Canada. 1979. A heat storage subsystem for solar energy: Final report–phase 2. Sol. Energy Proj. Rep. STOR-6. 85 pp.

National Research Council of Canada. 1980. Rock bed thermal energy storage. Sol. Energy Proj. Rep. STOR-8. 57 pp.

National Research Council of Canada. 1981*a*. A guide to rock bed storage units. Sol. Energy Proj. Rep. STOR-10. 53 pp.

National Research Council of Canada. 1981*b*. The solarium workbook. Sol. Tech. Ser. 2. 112 pp.

Roberts, W.J.; Bartok, J.W.; Fabian, E.E.; Simpkins, J. 1985. Energy conservation for commercial greenhouses. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. NRAES-3. 40 pp.

Sasaki, K.; Itagi, T. 1979. Studies on solar greenhouses heated by means of an earth-storage heat-exchange system. 1. Effects of atmospheric and thermal conditions in a greenhouse on growth and yield of tomatoes. Canada, Dep. Secretary of State, Translation Bureau. Translation 235467. (Translated from Bull. Kanagawa Hortic. Exp. Stn, 26 October 1979.)

Sibley, K.J.; Raghavan, G.S.Y. 1984. Heat transfer coefficients for air flow in plastic corrugated drainage tubes. Can. Agric. Eng. 26(2): 177-180.

Staley, L.M.; Molnar, J.M.; Monk, G.J. 1981. Design, construction and operating experience with two commercial solar heated greenhouses. Can. Soc. Agr. Eng. Pap. 81-232. 25 pp.

Staley, L.M.; Monk, G.J.; Thomas, D.; Lau, A.; Molnar, J.M. 1983. Earth thermal heat exchange systems for solar greenhouses. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.) Pap. 83-4525. 17 pp.

Towning, D.J.; Turkewitsch, A. 1981? Pages 1–217 *in* Energy efficient greenhouse design and operation. Bradford, Ont.: Frank Jonkman and Sons Ltd.

Annexes

Annexe A

Les stations météorologiques suivantes correspondent aux chiffres des tableaux 1 à 5:

No	Station	Province
1	Agassiz	Colombie-Britannique
2	Kamloops	Colombie-Britannique
3	Kimberley	Colombie-Britannique
4	Prince George	Colombie-Britannique
5	Summerland	Colombie-Britannique
6	Vancouver	Colombie-Britannique
7	Victoria	Colombie-Britannique
8	Brooks	Alberta
9	Calgary	Alberta
10	Edmonton	Alberta
11	Grand Prairie	Alberta
12	Lethbridge	Alberta
13	Medicine Hat	Alberta
14	Estevan	Saskatchewan
15	Moose Jaw	Saskatchewan
16	Regina	Saskatchewan
17	Rosetown	Saskatchewan
18	Saskatoon	Saskatchewan
19	Swift Current	Saskatchewan
20	Yorkton	Saskatchewan
21	Cypress River	Manitoba
22	Morden	Manitoba
23	Portage La Prairie	Manitoba
24	Rivers	Manitoba
25	Winnipeg	Manitoba
26	Brockville	Ontario
27	London	Ontario
28	North Bay	Ontario
29	Ottawa	Ontario
30	Peterborough	Ontario
31	Sudbury	Ontario
32	Toronto	Ontario
33	Windsor	Ontario
34	Drummondville	Québec
35	Montréal	Québec
36	Québec	Québec
37	Sherbrooke	Québec
38	Tadoussac	Québec
39	Trois-Rivières	Québec
40	Gander	Terre-Neuve
41	St. John's	Terre-Neuve
42	Stephenville	Terre-Neuve
43	Fredericton	Nouveau-Brunswick
44	Moncton	Nouveau-Brunswick
45	Saint John	Nouveau-Brunswick
46	Charlottetown	Île-du-Prince-Édouard
47	Halifax	Nouvelle-Écosse
48	Sydney	Nouvelle-Écosse

Tableau 1 Valeurs moyennes du rayonnement solaire global quotidien (MJ/m²) sur une surface horizontale.

Station météo	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
4	2,73	5,30	10,09	15,79	18,15	21,42	20,81	17,04	11,12	6,14	3,07	1,78
5	3,44	6,48	11,54	16,66	20,82	22,64	23,68	19,55	14,47	8,45	3,82	2,50
6	2,94	5,53	10,03	15,09	20,15	21,78	22,95	18,62	13,22	7,38	3,59	2,28
10	3,65	7,09	12,43	17,53	20,21	21,87	21,89	18,09	12,11	7,69	3,95	2,59
19	5,05	8,72	14,05	17,86	21,58	23,14	24,35	20,13	14,36	9,45	5,27	3,83
25	5,25	9,05	14,06	17,74	20,90	22,74	22,99	19,00	13,32	8,15	4,64	3,82
29	5,74	9,44	13,61	16,75	19,88	21,37	21,28	18,11	13,36	8,58	4,72	4,33
32	6,09	9,33	12,92	17,33	19,96	21,74	21,94	18,74	14,09	9,14	4,79	4,33
35	5,30	8,80	12,51	15,87	19,07	20,25	20,96	17,23	13,45	8,04	4,61	3,92
41	4,14	7,08	10,42	13,60	16,54	19,60	19,94	15,72	12,02	6,82	4,11	3,03
43	5,48	8,92	12,35	15,32	17,94	19,91	19,61	17,32	13,20	8,50	5,05	4,12
46	5,32	8,97	12,61	15,88	18,57	20,92	20,10	17,71	12,93	7,90	4,94	3,79
47	5,11	8,14	12,09	14,54	17,38	20,00	19,11	17,94	13,98	8,96	5,32	3,85

Tableau 2 Moyenne mensuelle et durée totale annuelle d'insolation effective en heures.

Station météo	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
1	42	68	102	135	177	174	246	210	157	105	58	35	1818
2	54	93	150	187	245	244	208	275	194	121	63	43	1977
3	31	109	183	181	276	242	346	307	182	146	89	32	2124
4	54	89	139	187	255	256	279	245	158	104	60	39	1865
5	49	83	148	198	250	261	320	277	206	140	63	40	2040
6	55	93	129	180	253	243	305	255	188	116	70	44	1931
7	70	98	150	198	277	176	338	287	209	139	81	60	2183
8	88	116	158	206	270	287	341	304	201	173	111	76	2334
9	99	121	156	196	237	240	317	278	188	166	116	94	2208
10	91	113	176	223	272	265	306	269	185	161	105	80	2237
11	83	116	154	204	245	254	281	246	163	151	93	66	2056
12	95	123	167	198	263	284	345	299	213	175	116	90	2370
13	91	118	149	199	256	261	342	292	188	165	105	86	2170
14	121	135	185	210	289	303	356	310	212	188	120	103	2536
15	105	125	166	218	279	285	344	297	202	173	110	85	2394
16	98	117	156	210	271	253	337	293	194	169	96	83	2277
17	99	117	163	208	279	283	334	290	179	157	95	77	2281
18	99	129	192	225	279	280	342	294	207	175	98	84	2403
19	92	114	156	208	177	281	342	297	194	168	110	85	2328
20	108	129	165	223	281	288	329	285	184	157	90	87	2328
21	115	136	158	202	253	260	313	272	186	158	96	94	2241
22	115	136	158	201	252	260	312	272	185	157	96	93	2241
23	121	144	176	220	266	276	316	283	185	152	91	93	2321
24	116	141	174	210	261	270	339	294	193	170	93	94	2359
25	112	139	170	209	246	259	331	276	183	158	81	86	2230
26	104	115	171	206	258	264	302	264	189	152	81	81	2186
27	69	96	128	170	233	243	274	253	177	153	73	61	1930
28	97	130	158	188	231	246	267	226	158	115	59	70	1945
29	96	115	150	175	231	245	277	243	171	138	76	78	1995
30	73	101	133	165	228	236	270	224	168	132	73	40	1843
31	100	131	152	207	247	246	288	251	150	122	77	84	2060
32	87	110	145	179	221	256	281	256	197	153	82	77	2045
33	83	104	123	169	201	221	239	216	121	84	47	58	1687
34	92	112	149	173	224	237	260	233	176	133	75	73	1936
35	93	109	156	171	220	241	264	238	180	140	70	77	1959
36	81	99	139	163	198	196	223	208	167	126	63	65	1708
37	83	107	136	167	227	245	266	231	167	131	72	65	1900
38	94	109	155	179	199	211	225	215	165	123	78	78	1832
39	97	113	161	180	228	230	241	226	174	134	78	80	1941
40	73	85	102	116	155	169	202	180	145	112	62	60	1461
41	64	76	89	116	158	188	213	184	145	111	62	52	1458
42	44	71	105	131	186	189	206	186	133	92	54	32	1432
43	103	118	141	160	201	203	234	218	166	140	85	91	1860
44	103	120	135	168	212	226	247	223	166	141	87	90	1918
45	99	118	143	160	202	199	218	204	163	138	87	88	1819
46	83	105	137	156	199	215	244	220	180	133	72	59	1803
47	93	118	140	165	206	203	226	216	182	154	95	84	1885
48	81	106	126	161	204	222	251	225	168	139	74	67	1824

Tableau 3 Degrés-jours au-dessous de 18 °C.

Station météo	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
1	524	382	368	255	159	83	37	36	88	221	362	464	2983
2	748	545	450	268	128	41	11	19	102	296	493	645	3751
3	860	642	584	380	236	122	47	64	193	391	617	770	4910
4	931	681	613	411	268	156	98	127	247	410	625	803	5376
5	664	505	443	278	144	52	13	19	94	279	467	593	3556
6	479	379	378	277	180	91	39	41	114	248	362	438	3030
7	463	374	382	288	197	113	64	66	124	251	360	427	3115
8	988	776	701	402	211	92	31	54	187	361	628	847	5283
9	923	713	681	441	265	141	68	98	223	386	620	800	5365
10	1068	829	764	443	245	123	79	108	246	414	705	962	5990
11	1108	851	781	459	248	131	78	108	245	430	719	973	6135
12	876	661	622	392	219	95	32	52	167	327	563	735	4745
13	949	726	645	371	183	71	19	36	155	329	587	793	4868
14	1062	849	740	418	211	71	18	39	174	359	648	902	5496
15	1046	832	730	415	208	68	20	39	175	360	648	890	5434
16	1113	894	800	440	221	84	29	50	196	398	693	955	5876
17	1139	880	806	451	222	91	38	62	206	409	702	971	5982
18	1155	920	825	441	217	88	32	60	208	407	711	995	6062
19	1012	800	733	434	235	101	37	60	196	381	652	873	5509
20	1178	947	854	475	241	91	35	65	217	410	716	1009	6242
21	1137	927	806	434	215	76	21	46	186	382	677	963	5875
22	1094	883	766	428	202	57	13	28	156	339	643	943	5560
23	1126	919	787	444	220	66	18	40	175	357	663	967	5787
24	1155	933	832	457	239	83	24	45	196	389	704	1012	6075
25	1154	948	811	439	219	69	21	43	178	369	676	991	5923
26	820	716	591	341	163	38	6	19	100	262	448	720	4229
27	763	681	585	349	183	51	13	22	101	267	448	665	4132
28	960	827	721	445	235	88	36	61	182	360	568	858	5348
29	896	777	650	374	174	44	10	27	127	306	504	797	4691
30	851	747	645	366	195	66	20	36	140	314	475	733	4593
31	982	863	745	458	238	84	30	56	181	361	576	874	5451
32	766	680	588	355	187	51	12	20	102	272	440	666	4143
33	709	616	520	299	135	27	2	6	61	218	409	615	3622
34	891	783	655	380	176	48	9	31	134	313	487	791	4701
35	874	762	636	368	165	40	8	23	116	289	481	771	4537
36	932	815	698	442	227	72	23	48	169	352	546	838	5165
37	921	800	690	437	235	95	44	73	183	356	529	805	5173
38	908	794	694	475	292	114	53	81	204	376	549	806	5350
39	933	811	677	408	196	59	16	41	150	329	529	837	4993
40	749	699	666	512	366	192	72	91	200	371	486	674	5083
41	666	621	610	479	364	196	79	77	175	322	425	587	4606
42	711	683	645	485	343	183	72	70	182	338	453	640	4811
43	842	745	633	419	229	79	20	37	153	326	497	758	4739
44	809	727	648	450	266	103	28	44	156	323	481	726	4763
45	798	721	635	443	278	128	48	55	162	321	470	705	4768
46	778	719	654	471	295	117	28	37	139	306	456	683	4688
47	743	680	609	440	274	106	29	32	131	292	437	646	4424
48	703	674	634	481	328	152	45	45	140	297	425	612	4540

Tableau 4 Plus importante chute de neige en 24 heures (cm).

Station météo	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
1	45,7	45,7	30,5	15,2	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	35,6	33,0	45,7
2	33,8	10,7	16,8	2,8	T	0,0	T	0,0	T	2,8	30,2	23,9	33,8
3	32,3	23,6	17,8	18,5	6,6	T	T	0,0	3,3	10,2	38,1	31,0	38,1
4	29,2	22,9	19,8	21,8	9,4	0,5	T	T	9,1	22,1	26,9	29,0	29,0
5	19,1	30,5	33,5	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,7	19,8	45,7	45,7
6	29,7	18,3	25,9	3,6	T	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	22,1	31,2	31,2
7	29,2	22,4	21,3	5,1	T	0,0	0,0	0,0	T	T	16,0	34,8	34,8
8*	16,5	17,5	18,0	17,3	15,5	0,0	0,0	0,0	7,6	20,3	18,8	35,1	35,1
9	25,4	27,7	24,1	45,7	48,3	24,9	0,3	6,1	22,9	29,7	35,6	21,8	48,3
10*	20,3	19,1	21,1	22,6	12,8	T	0,0	0,0	7,6	31,5	15,7	16,8	31,5
11	21,8	21,3	22,1	15,7	17,5	T	0,0	19,3	12,7	36,3	21,3	23,4	36,3
12	18,8	24,4	33,5	52,6	32,5	10,9	T	3,8	55,1	35,8	37,8	21,6	55,1
13	26,4	27,9	33,8	25,4	14,0	1,5	0,0	0,0	26,2	21,6	26,7	22,9	33,8
14	15,5	24,9	15,7	35,1	16,8	T	T	0,0	11,7	29,0	18,0	18,8	35,1
15	16,8	20,8	16,3	24,1	11,2	T	0,0	0,0	27,2	18,3	14,5	13,2	27,2
16	14,0	19,1	25,4	23,2	19,8	7,6	T	0,0	21,6	21,3	23,9	14,2	25,4
17	25,4	15,2	15,2	25,4	19,1	T	0,0	0,0	10,2	27,9	20,3	22,9	27,9
18	15,5	30,0	26,9	19,1	18,5	T	T	0,0	7,1	28,4	19,1	16,3	30,0
19	13,7	22,1	33,5	22,9	20,1	5,1	0,0	0,0	12,7	17,8	22,9	18,3	33,5
20	24,9	43,2	21,8	23,6	9,1	T	0,0	0,0	13,2	26,4	24,1	19,1	43,2
21	21,0	40,6	30,5	38,1	13,0	0,0	0,0	0,0	2,5	25,4	28,2	25,4	40,6
22	35,6	25,4	45,7	25,4	22,9	T	0,0	0,0	7,6	15,2	40,9	38,1	45,7
23	22,4	18,8	25,4	53,8	11,7	0,0	0,0	0,0	12,2	21,8	18,8	16,5	53,8
24	17,8	65,0	18,5	20,1	13,2	T	0,0	0,0	3,3	40,6	19,3	25,4	65,0
25	19,1	23,6	35,6	21,3	21,1	0,3	0,0	0,0	1,8	24,6	27,7	21,6	35,6
26	51,8	47,5	45,0	30,5	7,1	0,0	0,0	0,0	2,5	29,0	40,6	31,8	51,8
27	32,5	30,0	27,4	21,8	5,8	0,0	0,0	0,0	T	15,7	40,6	57,0	57,0
28	26,0	26,2	26,7	27,7	10,2	0,0	0,0	0,0	2,0	11,4	27,9	20,3	27,9
29	38,6	39,6	40,6	26,7	15,0	T	0,0	T	1,5	15,5	25,4	30,4	40,6
30	66,0	40,6	55,9	23,4	15,2	0,0	0,0	0,0	2,5	15,2	27,9	30,5	66,0
31	37,0	37,8	34,0	33,5	9,9	T	0,0	0,0	1,8	17,0	21,8	27,2	37,8
32	36,8	39,9	32,3	26,7	2,3	T	0,0	0,0	T	7,4	33,5	28,2	39,9
33	23,9	36,8	22,4	14,2	0,5	T	0,0	0,0	T	2,4	34,8	32,3	36,8
34	71,1	38,1	38,1	27,9	15,2	0,0	0,0	0,0	0,8	29,2	50,8	36,3	71,1
35	32,8	39,4	43,2	25,7	21,8	0,0	0,0	0,0	6,1	14,2	30,5	37,8	43,2
36	32,3	29,2	43,9	33,0	7,1	0,3	0,0	0,0	T	17,3	30,5	35,6	43,9
37*	40,3	31,2	33,0	27,7	16,3	T	0,0	0,0	T	24,4	37,8	34,8	40,3
38	45,7	55,9	61,0	30,5	10,2	T	0,0	0,0	T	25,4	45,7	45,7	61,0
39	38,1	40,6	41,9	43,7	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	41,1	48,3	48,3
40	35,2	47,8	41,4	37,8	16,5	21,8	T	T	5,1	20,8	43,8	45,7	47,8
41	38,4	54,9	45,7	31,6	25,4	13,5	T	0,0	0,3	19,8	25,3	49,3	54,9
42	56,1	41,7	33,0	21,1	14,0	2,5	0,0	0,0	0,3	12,7	16,5	35,3	56,1
43	36,1	40,6	34,8	26,4	15,2	0,0	0,0	0,0	T	11,4	35,1	78,0	78,0
44	40,6	76,2	40,6	45,7	21,6	1,3	0,0	0,0	T	22,4	31,0	38,1	76,2
45	42,4	34,8	40,1	26,2	10,2	0,0	T	0,0	0,0	19,8	21,3	58,2	58,2
46	47,2	47,5	33,5	38,1	13,2	T	0,0	0,0	T	21,6	30,5	32,0	47,5
47*	43,7	47,2	24,6	28,4	26,9	T	0,0	0,0	T	38,6	20,3	47,5	47,5
48	44,5	45,2	37,3	29,2	24,9	1,0	0,0	0,0	T	15,7	21,6	58,7	58,7

*Données datant de moins de 25 ans

Tableau 5 Vitesse moyenne du vent (km/h) et direction dominante.

Station météo	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
1	14,0	9,4	7,8	6,9	6,1	4,9	4,9	4,5	5,5	6,0	9,5	12,8	7,7
	NE	N	N	S	S	S	S	S	S	S	N	N	S
2	11,8	11,5	13,4	13,2	12,3	11,8	10,5	10,0	10,2	12,1	13,1	13,9	12,0
	E	E	E	O	O	O	O	O	E	E	E	E	E
3	8,5	9,0	10,0	12,1	11,0	11,1	10,5	9,9	9,3	10,4	9,4	8,6	10,0
	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
4	11,4	11,9	11,9	11,7	10,8	9,9	8,7	8,3	9,2	12,5	12,2	12,1	10,9
	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
5	5,9	4,8	6,0	6,8	6,3	7,0	5,8	5,4	4,8	4,3	4,4	4,8	5,5
	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	S	N
6	12,2	12,4	13,5	13,3	11,8	11,5	11,4	10,6	10,6	11,2	12,2	13,0	12,0
	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
7	12,5	12,1	12,5	12,1	11,1	10,5	9,5	9,2	9,1	10,0	11,4	12,7	11,1
	O	O	O	O	O	SE	SE	SE	O	O	O	O	O
8	13,2	12,6	13,4	16,0	14,9	13,9	12,3	12,1	12,5	14,1	13,6	13,6	13,5
	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SO	S	SO	NO
9	16,2	15,8	16,4	18,1	18,2	17,0	14,9	14,4	15,8	16,3	15,4	16,1	16,2
	O	S	S	NNO	NNO	NNO	NNO	NNO	NNO	O	O	O	O
10	13,4	13,4	13,4	15,2	15,7	13,6	11,6	11,3	13,0	13,6	12,9	13,1	13,4
	S	S	S	S	SE	O	O	O	S	S	S	S	S
11	11,5	12,3	12,8	14,5	16,8	16,2	14,1	13,6	13,7	14,4	12,0	11,3	13,6
	NO	NO	NO	O	O	O	O	O	O	O	O	NO	O
12	21,2	21,2	21,0	21,3	20,4	20,0	16,9	16,8	18,4	22,5	22,4	23,1	20,4
	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
13	15,3	15,2	16,2	18,1	17,3	16,1	14,4	14,5	15,7	17,3	16,7	16,8	16,1
	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
14	21,5	21,0	20,5	20,8	20,8	19,1	17,8	17,9	19,7	20,4	20,5	21,0	20,1
	NO	NO	NO	E	E	O	NO	E	NO	NO	NO	SO	NO
15	21,6	21,2	21,2	21,3	21,4	19,8	17,5	17,4	20,3	20,9	21,0	21,8	20,5
	ONO	ONO	ONO	SE	SE	O	O	O	O	ONO	ONO	ONO	ONO
16	21,8	21,6	22,0	22,6	22,1	19,9	17,7	18,1	20,4	20,5	20,9	21,7	20,8
	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
17	14,9	15,5	15,2	16,8	16,9	15,8	14,0	14,1	15,0	16,3	14,8	15,2	15,4
	O	SE	SE	SE	SE	NO	NO	SE	NO	NO	SE	O	SE
18	16,8	16,4	17,5	19,0	19,4	18,2	16,7	16,5	18,1	18,0	16,9	16,8	17,5
	ONO	SO	SE	SE	SE	ONO	O	ONO	ONO	S	ONO	ONO	ONO
19	25,1	24,4	23,4	23,3	22,9	21,7	19,4	19,6	22,1	23,6	23,7	25,1	22,9
	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
20	17,3	16,7	17,5	18,3	19,2	17,8	16,0	15,6	17,8	18,6	18,0	17,3	17,5
	NO	NO	NO	S	S	S	O	S	S	S	NO	NO	NO
21	18,2	17,6	18,1	19,0	19,4	17,9	15,6	15,4	17,6	19,0	17,9	17,3	17,8
	NO	NO	NO	NE	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
22	13,5	12,6	13,6	13,5	14,0	13,2	11,0	10,5	12,1	13,0	13,7	13,8	12,9
	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
23	17,9	16,8	17,7	18,7	18,3	16,0	14,4	14,4	16,4	18,0	17,8	17,2	17,0
	NNO	NNO	NNO	N	N	N	O	N	N	O	O	O	NNO
24	18,7	17,5	18,5	21,3	21,8	19,3	17,0	17,1	19,1	19,9	19,4	18,4	19,0
	NO	NO	NO	NO	E	E	NO	E	NO	NO	NO	NO	NO

Tableau 5 Vitesse moyenne du vent (km/h) et direction dominante (suite).

Station météo	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
25	18,6	18,1	19,3	20,9	20,2	18,1	16,0	16,4	18,5	19,6	19,4	18,6	18,6
	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
26	14,0	13,4	13,4	14,1	14,2	14,3	13,6	13,7	15,4	17,0	16,2	12,9	14,4
	O	NO	NO	NO	NO	SO	NO	NO	SO	NO	NO	O	NO
27	19,7	18,4	18,9	18,4	15,9	13,5	11,8	11,5	12,9	14,7	17,6	18,4	16,0
	O	O	E	E	E	S	SSO	O	E	O	OSO	OSO	O
28	15,1	15,4	16,3	16,4	15,1	13,8	12,9	12,5	13,4	14,3	15,6	14,8	14,6
	N	N	N	N	SO	SO	SO	SO	SO	SO	O	E	SO
29	16,2	16,2	16,7	16,8	14,8	13,2	11,8	11,5	12,8	14,1	15,2	15,5	14,6
	ONO	ONO	E	E	SO	SO	SO	SO	O	E	E	ONO	ONO
30	12,8	11,8	13,5	13,8	11,2	10,0	8,7	7,9	8,9	10,3	11,6	11,6	11,0
	O	ONO	ONO	ONO	ONO	ONO	O	O	O	O	O	OSO	O
31	21,0	21,8	21,4	21,7	21,1	20,1	18,8	17,9	19,1	20,4	21,5	21,0	20,5
	N	N	N	N	N	SO	SO	SO	S	S	S	N	N
32	18,4	17,6	17,6	17,3	14,9	13,4	12,5	12,3	13,0	14,1	16,6	17,0	15,4
	OSO	N	N	N	N	N	N	N	N	O	O	O	N
33	20,0	19,9	20,6	19,7	17,2	14,8	12,9	12,5	13,7	15,7	18,4	18,9	17,0
	OSO	SO	ONO	SSO	SSO	SSO	SO	SO	SSO	SSO	SSO	SO	SSO
34	11,5	12,0	12,4	11,8	10,6	9,2	8,2	7,9	8,5	9,9	10,3	10,6	10,2
	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
35	18,3	17,9	17,9	16,9	15,3	14,5	13,1	12,2	13,1	14,8	16,6	16,8	15,6
	OSO	OSO	OSO	O	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O	OSO
36	18,9	18,9	18,0	16,6	16,5	14,5	12,8	12,9	13,4	15,0	16,2	17,7	16,0
	OSO	OSO	ENE	ENE	ENE	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO
37	11,5	12,0	12,4	11,8	10,6	9,2	8,2	7,9	8,5	9,9	10,3	10,6	10,7
	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
38	15,7	15,8	16,1	14,7	13,5	13,1	12,5	12,0	12,3	14,4	14,6	15,0	14,1
	S	S	S	N	N	S	S	S	S	S	S	S	S
39	10,1	10,6	11,9	12,1	11,1	9,7	9,0	8,5	8,6	10,0	11,0	11,2	10,3
	SO	NE	NE	NE	NE	SO	SO	SO	NE	NE	NE	NE	NE
40	24,4	23,9	23,4	21,6	19,7	18,7	17,3	17,2	18,9	20,6	21,8	22,8	20,9
	O	O	O	NNO	O	SO	SO	OSO	O	OSO	O	O	O
41	27,5	27,5	26,9	24,4	22,9	22,2	21,4	21,2	22,1	23,8	25,2	26,8	24,3
	O	O	O	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	O	O	OSO
42	19,3	18,3	16,9	15,5	13,9	11,9	11,1	12,7	13,9	14,8	16,9	18,5	15,3
	O	O	ENE	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	O	O	O	O
43	14,6	14,8	16,0	14,8	14,7	13,6	12,3	11,6	12,0	13,0	13,4	14,3	13,8
	ONO	ONO	ONO	ONO	SSO	SSO	SSO	SSO	SSO	SSO	ONO	ONO	ONO
44	20,3	19,8	20,5	19,0	18,1	16,9	15,2	15,2	16,2	17,7	18,7	19,9	18,1
	O	OSO	OSO	OSO	OSO	SO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO
45	20,6	20,2	21,0	19,1	18,3	17,3	15,5	15,0	16,4	18,3	19,8	20,5	18,5
	NO	NO	NO	N	SSO	SSO	S	S	SSO	SSO	NO	NO	S
46	22,1	20,8	21,7	19,9	18,9	18,0	16,1	16,0	17,2	19,1	20,4	21,5	19,3
	O	O	O	N	OSO	OSO	OSO	OSO	OSO	O	O	O	O
47	20,2	19,7	20,7	19,2	18,5	17,3	15,9	15,4	15,7	17,2	18,5	19,8	18,2
	ONO	ONO	N	N	S	S	SSO	S	SSO	SSO	N	NO	SSO
48	24,4	23,8	24,1	22,2	21,1	20,0	18,6	18,4	19,3	21,3	22,9	23,8	21,7
	O	O	N	N	SSO	SO	SSO	SO	SO	SO	O	O	SO

Annexe B

Diagrammes solaires

Un bon diagramme solaire correspondant à la latitude du site peut aider un producteur à déterminer la quantité de rayonnement solaire qui atteint une serre déjà construite ou l'emplacement éventuel d'une nouvelle serre. Nous disposons de diagrammes solaires pour les latitudes suivantes: 43°, 49°, 53° et 60° (figures 20, 21, 22 et 23 respectivement). Les arbres, les bâtiments, les montagnes et tout autre obstacle qui risquent de bloquer le rayonnement solaire devraient être portés sur la maquette appropriée une fois que leurs coordonnées angulaires et l'azimut (angles horizontaux à partir du sud géographique) ont été établis.

Un rapporteur peut être utilisé avec un fil à plomb (fig. 18) pour mesurer la hauteur angulaire des obstacles qui se trouvent autour d'une serre. Une boussole va indiquer l'angle horizontal à partir du sud géographique. Il ne faut pas se servir du sud magnétique sinon les données du diagramme seront fausses.

En dessinant les obstacles sur le diagramme, à l'aide de leurs coordonnées angulaires respectives et de l'azimut, il est possible de lire le pourcentage de rayonnement bloqué par ces derniers en se servant des chiffres qui se trouvent dans les cases noircies.

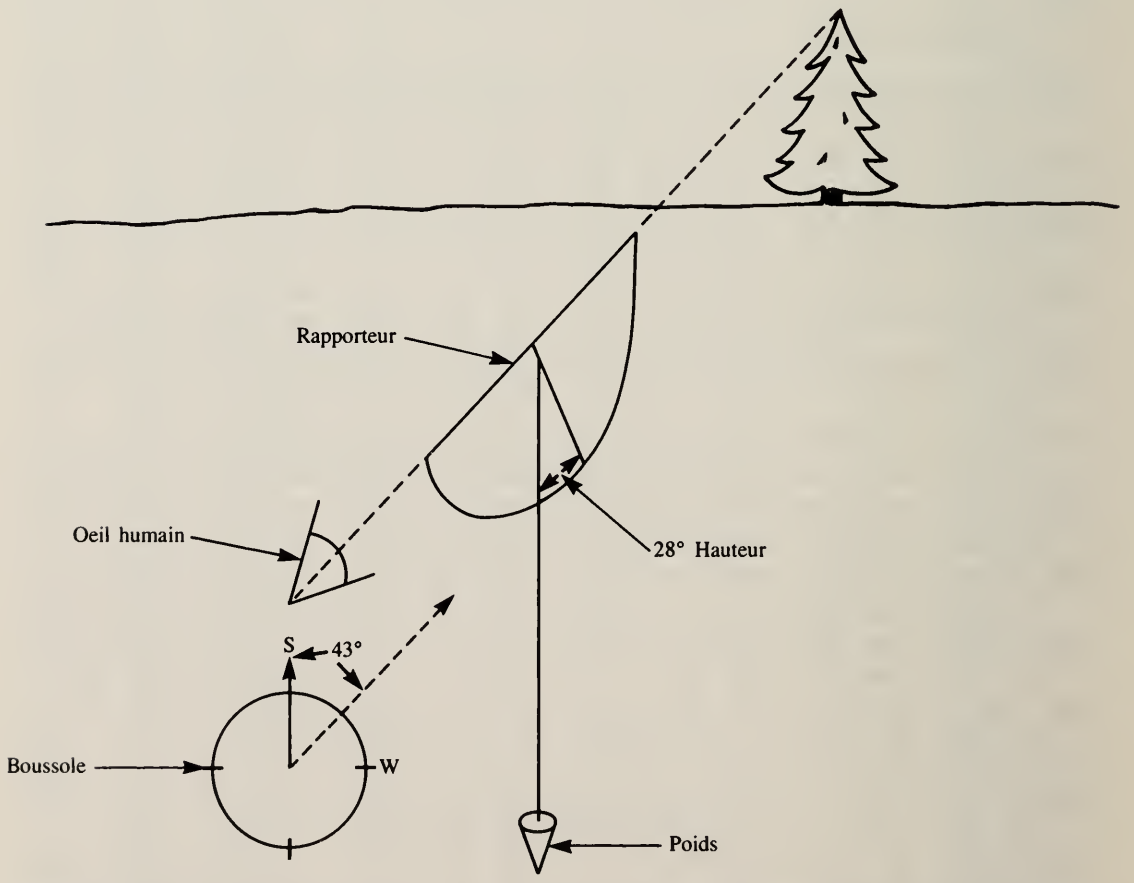


Fig. 18 *Rapporteur utilisé pour mesurer la hauteur angulaire des obstacles qui se trouvent autour d'une serre.*

Exemple :

Un arbre situé à 43° du sud géographique (angle horizontal) avec une hauteur de 28° (angle vertical) bloque le rayonnement solaire direct qui atteint la serre comme suit (fig. 19) :

- environ 9 % en décembre ;
- environ 12 % en janvier et novembre (y compris l'ombre des branches extérieures) ;
- environ 9 % en février et octobre ;
- presque 0 % pendant la période de mars à septembre.

Étant donné qu'en octobre moins de 15 % de la lumière incidente est bloqué et qu'il n'y a pour ainsi dire pas d'ombre pendant les mois qui restent entre mars et octobre qui constituent la période de culture, ce site conviendrait pour le chauffage solaire.

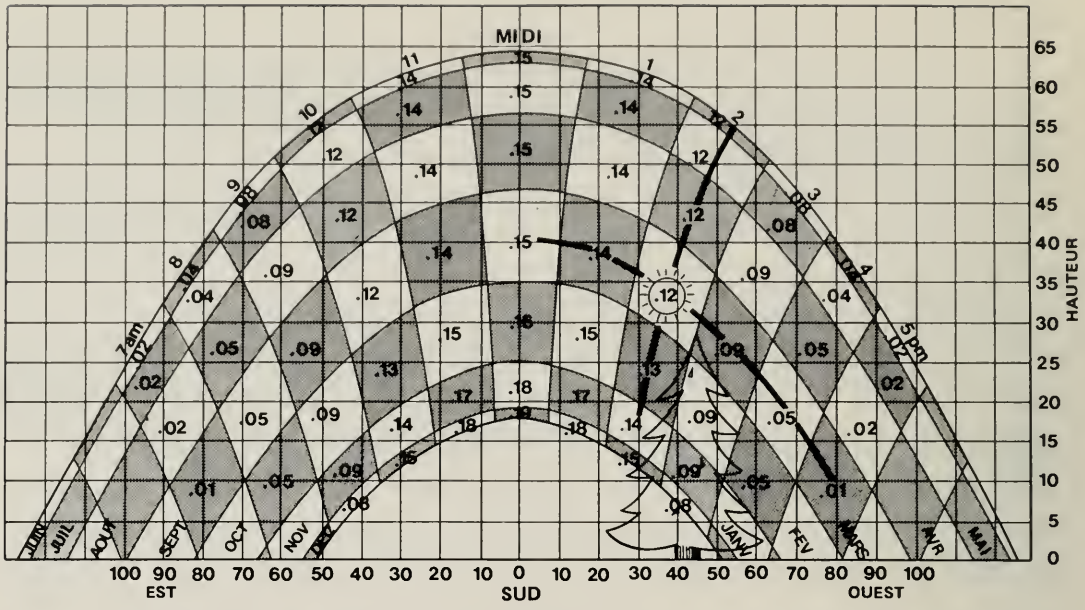


Fig. 19 *Diagramme solaire 49° N. Fraction heure par heure de l'ensoleillement global quotidien.*

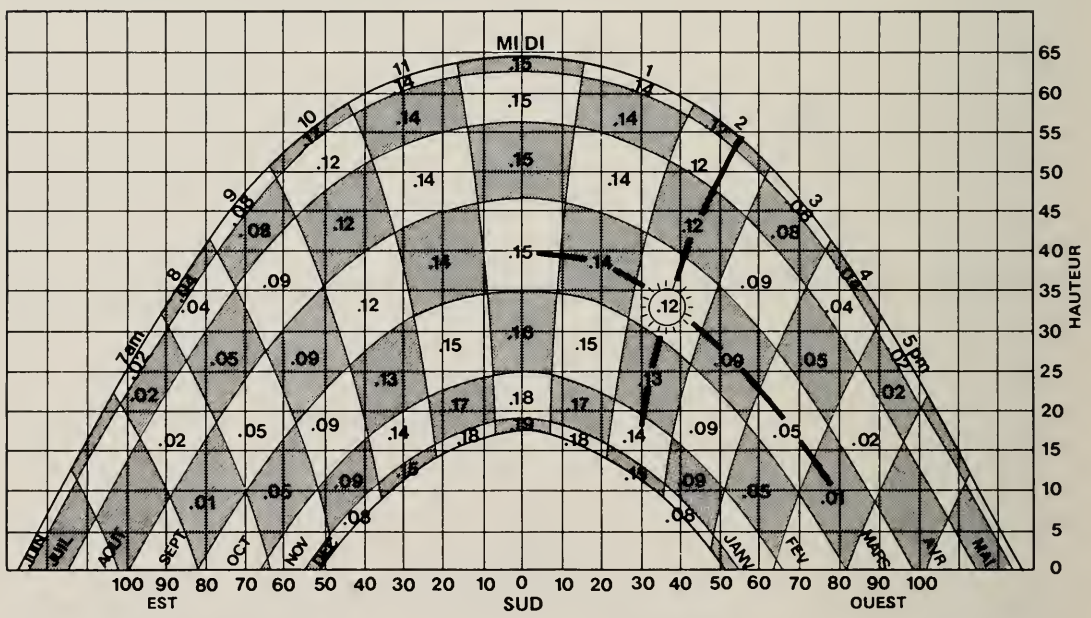


Fig. 20 *Diagramme solaire 49° N. Fraction heure par heure du rayonnement solaire global quotidien. Le diagramme solaire décrit en deux dimensions la course du soleil dans le ciel à une latitude donnée pendant toute une année. La ligne du bas représente la ligne d'horizon. L'arche inférieure décrit la course du soleil au solstice d'hiver (21 décembre) et l'arche supérieure, au solstice d'été (21 juin).*

Les rayons indiquent l'heure de la journée (heure normale). Les chiffres des heures sont centrés sur chaque case.

Le chiffre à l'intérieur de la case indique la fraction d'énergie solaire (dans des conditions idéales) qui est dégagée pendant une période d'une heure, entre 30 minutes avant et 30 minutes après l'heure indiquée, le 21e jour du mois. L'exemple tracé point par point indique que le 21 mars ou le 21 septembre, 12 % du rayonnement solaire global tombant sur une surface verticale va se produire (dans des conditions idéales) entre 1 h 30 et 2 h 30, heure solaire locale. Dans le présent diagramme, nous avons fait une moyenne et la supposons constante pendant un mois. L'heure solaire locale est inférieure à l'heure normale locale.

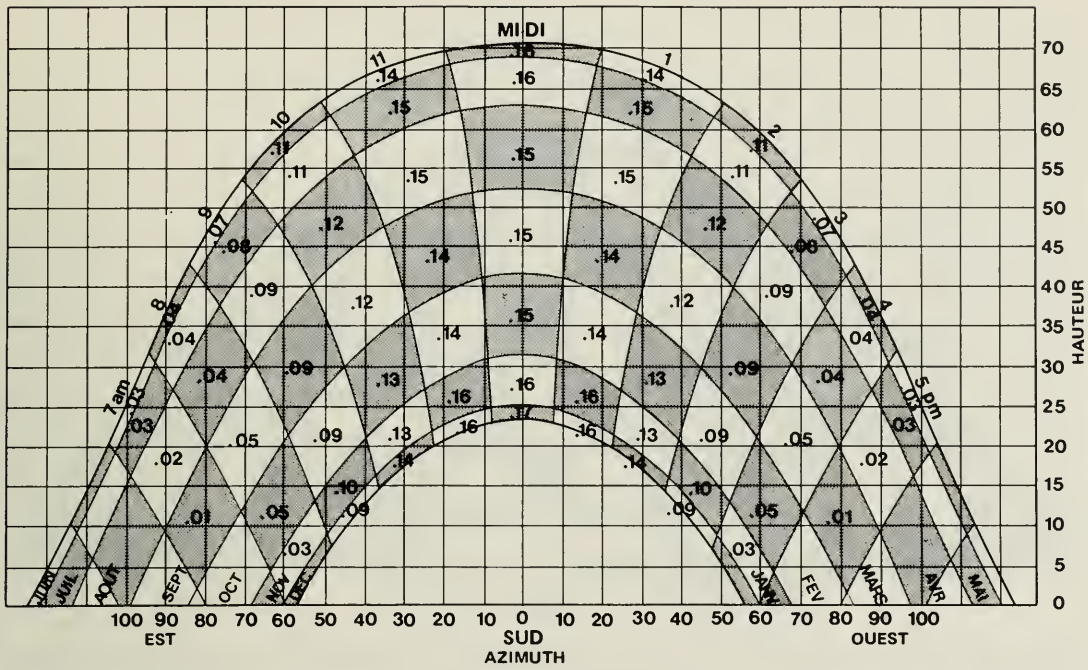


Fig. 21 *Diagramme solaire 43° N. Fraction heure par heure du rayonnement global quotidien.*

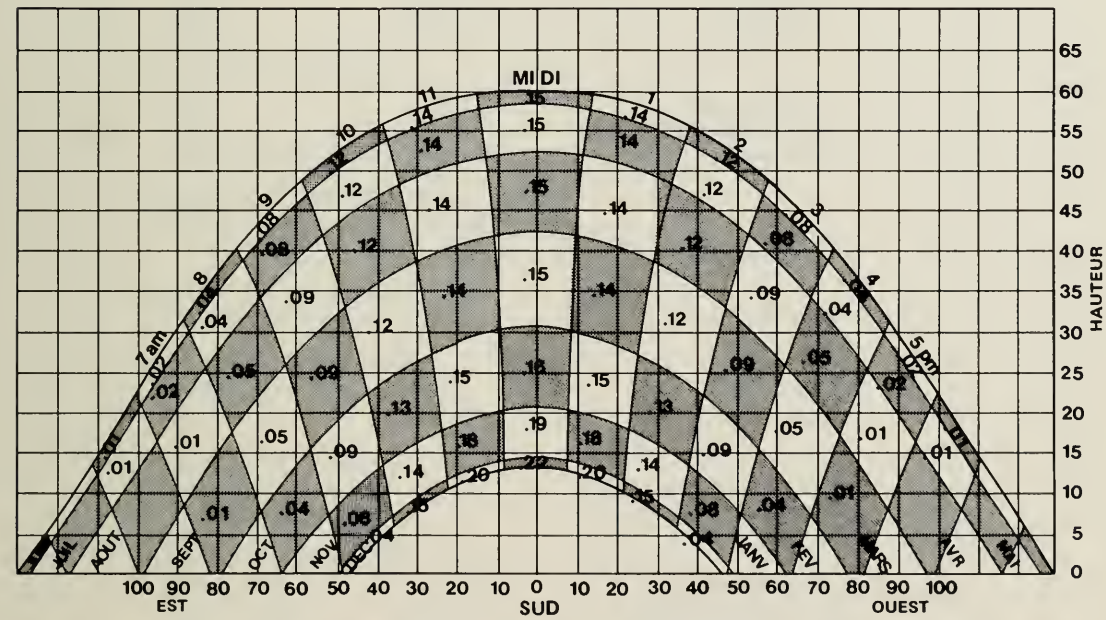


Fig. 22 *Diagramme solaire 53° N. Fraction heure par heure du rayonnement global quotidien.*

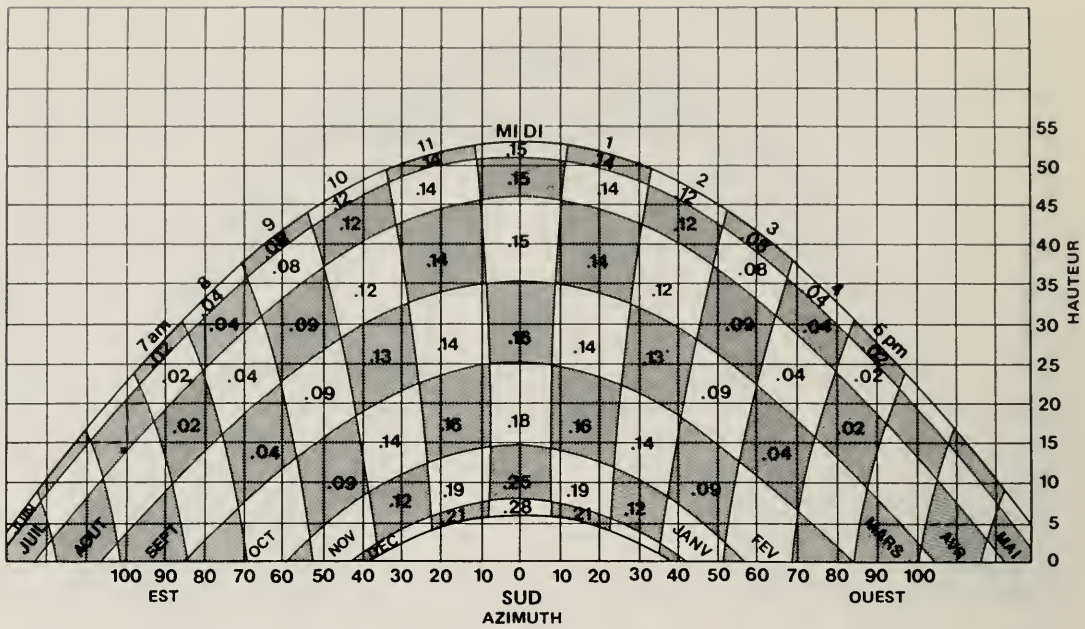


Fig. 23 *Diagramme solaire 60° N. Fraction heure par heure du rayonnement global quotidien.*

FACTEURS DE CONVERSION VERS LE SYSTÈME MÉTRIQUE

Unités impériales	Facteur de conversion	Résultat en:	
MESURES DE LONGUEUR			
pouce	x 25	**millimètre**	**(mm)**
pied	x 30	**centimètre**	**(cm)**
verge	x 0,9	**mètre**	**(m)**
mille	x 1,6	**kilomètre**	**(km)**
MESURES DE SURFACE			
pouce carré	x 6,5	**centimètre carré**	**(cm^2)**
pied carré	x 0,09	**mètre carré**	**(m^2)**
acre	x 0,40	**hectare**	**(ha)**
MESURES DE VOLUME			
pouce cube	x 16	**centimètre cube**	**(cm^3)**
pied cube	x 28	**décimètre cube**	**(dm^3)**
verge cube	x 0,8	**mètre cube**	**(m^3)**
once liquide	x 28	**millilitre**	**(mL)**
chopine	x 0,57	**litre**	**(L)**
pinte	x 1,1	**litre**	**(L)**
gallon	x 4,5	**litre**	**(L)**
MESURES DE POIDS			
once	x 28	**gramme**	**(g)**
livre	x 0,45	**kilogramme**	**(kg)**
tonne courte (2000lb)	x 0,9	**tonne**	**(t)**
MESURE DE TEMPÉRATURE			
degrés Fahrenheit	(°F-32) x 0,56 ou (°F-32) x 5/9	**degrés Celsius**	**(°C)**
MESURE DE PRESSION			
livre au pouce carré	x 6,9	**kilopascal**	**(kPa)**
MESURE DE PUISSANCE			
horsepower*	x 746	**watt**	**(W)**
	x 0,75	**kilowatt**	**(kW)**
MESURES DE VITESSE			
pied à la seconde	x 0,30	**mètre à la seconde**	**(m/s)**
mille à l'heure	x 1,6	**kilomètre à l'heure**	**(km/h)**
MESURES AGRAIRES			
gallon à l'acre	x 11,23	**litre à l'hectare**	**(L/ha)**
pinte à l'acre	x 2,8	**litre à l'hectare**	**(L/ha)**
chopine à l'acre	x 1,4	**litre à l'hectare**	**(L/ha)**
once liquide à l'acre	x 70	**millilitre à l'hectare**	**(mL/ha)**
tonne à l'acre	x 2,24	**tonne à l'hectare**	**(t/ha)**
livre à l'acre	x 1,12	**kilogramme à l'hectare**	**(kg/ha)**
once à l'acre	x 70	**gramme à l'hectare**	**(g/ha)**
plants à l'acre	x 2,47	**plants à l'hectare**	**(plants/ha)**

*Le horsepower est une unité différente du cheval-vapeur.
Le signe décimal est une virgule.

LIBRARY / BIBLIOTHEQUE
AGRICULTURE CANADA OTTAWA K1A 0C5
3 9073 00053072 7

Canada